الكيمياء النووية والمشعة

الأستاذ الدكتور

فواز عزت الخليلي

الجامعة الأردنية

دار الصفاء

الكيمياء النووية والمشعة

NUCLEAR AND RADIOCHEMISTRY

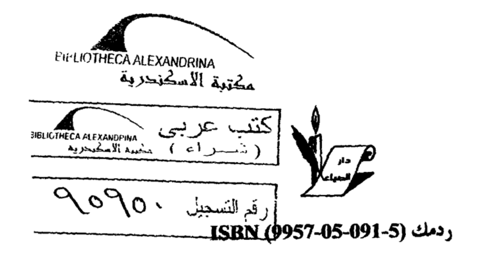
تأليف

أ.د. فواز عزت الخليلي

أستاذ الكيمياء النووية وغير العضوية

قسم الكيمياء

الجامعة الأردنية



ردمك ISBN (9957-05-091-5)





رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية ٢٥٠٩/١٢/٢٠٠١

٥٤١,٣٨
الخليلي ، فواز عزت
الكيمياء النووية والمشعة - NUCLEAR AND RADIOCHEMISTRY
/ فواز عزت الخليلي - عمان : دار الضياء للنشر والتوزيع ، ٢٠٠١
(٣٣٦) ص
ر.إ. (٢٥٠٩/١٢/٢٠٠١)
الواصفات : / الكيمياء الإشعاعية // الكيمياء /

■ تم إعداد بيانات الفهرسة والتصنيف الأولية من قبل دائرة المكتبة الوطنية

رقم الإجازة المتسلسل ٢٣٦٦/١٢/٢٠٠١

١٤٢٩ هـ | ٢٠٠٨ م

صمم الغلاف أنس أحمد الجدع

إهداء

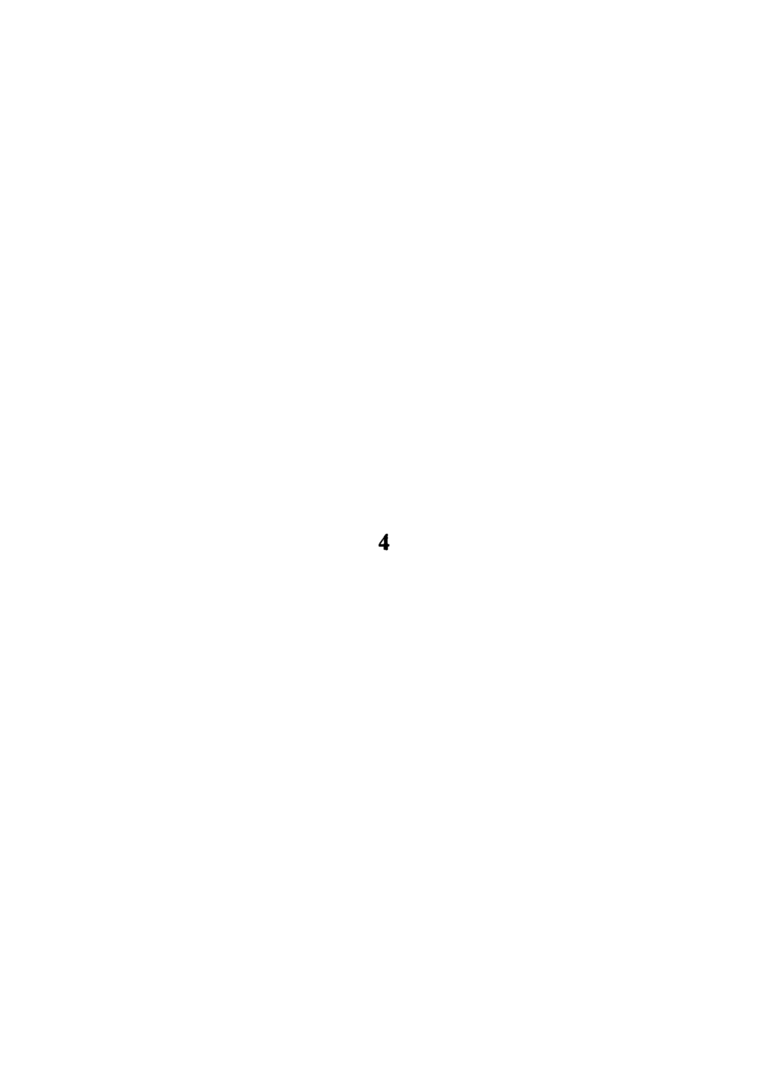
إلى ذكرى والدي عزت حمدي الخليلي العطرة .

أ.د فواز عزت الخليلي

تم بعون ا لله إنجاز هـذا الكتـاب في إجـازة التفـرغ العلمـي . راجياً من ا لله تعالى أن يكـون مفيـداً للدارسـين والمهتمـين في هـذا الموضوع . كما أشكر الجامعة الأردنية على إتاحة الفرصة لتـأليف هذا الكتاب .

والسلام عليكم ورحمة ا لله .

أ.د. فواز عزت الخليلي



4

المحتويات



6

الفصل الأول

مقدمة

INTRODUCTION

اكتشف العالم رونتجن في عام 1895 أشعة أكس (X) ووجد أنها تتكون باصطدام الإلكترونات ذات الطاقة العالية بالمصعد في أنبوب التفريغ وقد أطلق عليها اسم أشعة إكس ، وسميت أحياناً بأشعة رونتجن . وهي ذات قدرة عالية على الاختراق . وبعد ذلك بعام اكتشف العالم الفرنسي هنري بيكوريل أن ملح اليورانيوم المزدوج $K_2UO_2(SO_4)_2.2H_2O$ يطلق إشعاعات تسود اللوحات الفوتوغرافية . وقد أثار هذا التأثير فضوله وقرر أن يقوم بعدة تجارب لمعرفة طبيعة ما يجري . فوجد أن هذا التأثير لا يتغير إذا تعرض ملح اليورانيوم لضوء خافت أو لضوء الشمس أو إذا تم تحضيره في الظلام وأجريت عليه التجربة في الظلام . كما وجد أن لهذا الإشعاع قدرة على اختراق الورق الأسود والزجاج . ثم قام بعد ذلك بدراسة أملاح اليورانيوم الأخرى ومحاليله فوجد نفس الظاهرة وأن شدة التأثير تتناسب طردياً مع كمية عنصر اليورانيوم الموجودة في العينة المدروسة .

ولاحظ العالم بيكوريل أن هذه الإشعاعات قدرة على إزالة الشحنة من كشاف كهربائي مشحون سابقاً . بعد ذلك تابع العلماء دراساتهم لفهم ما يحدث وفي عام 1898 توصل العالمان ماري وبيركوري إلى أن إشعاعات اليورانيوم هي ظاهرة نووية خاصة بعنصر اليورانيوم ولا تتأثر بالطبيعة الكيميائية والفيزيائية له . وسمى هذه الظاهرة بظاهرة النشاط الإشعاعي .

1-1-1 النشاط الإشعاعي Radioactivity

بعد ذلك توصل العالمان كوري وشمت إلى أن الثوريوم Th يطلق إشعاعات شبيهة بالتي يطلقها اليورانيوم . وأن لبعض خامات اليورانيوم الطبيعية نشاط إشعاعي

أعلى من اليورانيوم النقي ومن عينات محضرة مخبرياً لها نفس المكونات الكيميائية .

إن التحليل الكيميائي لخامات اليورانيوم الطبيعية قد شكل بداية لعلم الكيمياء المشعة والذي أدى إلى اكتشاف عنصر البولونيوم المشع وعنصر الراديوم المشع . وتركز الراديوم مع الباريوم المفصول كيميائياً من خام البتش بلند (يحتوي هذا الخام الأسود المظهر على 75٪ U_3O_8) ومن ثم تبين لهم أنه بالإمكان تركيز الراديوم من الباريوم بواسطة عملية البلورة الجزئية للكلوريدات والتي تبقي ملح الراديوم في المحلول .

في عام 1902 تمكنت مدام كوري من فصل 100 ملغم من كلوريد الراديوم النقي وقدرت الوزن الذري للراديوم بـ 225 . بعد ذلك أعادة تحديد الوزن الذري بـ 226.5 وحضرت عنصر الراديوم بواسطة التحليل الكهربائي لمصهور كلوريد الراديوم .

بين العالم بيكوريل أن اليورانيوم يطلق إشعاعاته إذا كان في الظلام ولم يتعرض إلى أي مصدر طاقة لسنوات طويلة دون أي نقصان في شدة الإشعاعات . وقدر العالم رذرفورد طاقة هذه الإشعاعات . أما مدام كوري وزوجها فلقد قاسوا التأثير الحراري للراديوم والذي يساوي 100 كالوري/ساعة غم راديوم . وهذه الحقيقة دفعت بالعلماء إلى الاهتمام بالراديوم ونشاطه الإشعاعي (حتى أن جريدة سانت لويس في 1903/10/4 توقعت استخدام هذه الحقيقة (الظاهرة) في الحروب كوسيلة دمار للعالم) .

1-1-2 خصائص الإشعاعات Radiation Properties

فسر العلماء اختفاء الشحنة من الكشاف الكهربائي نتيجة تعرضه لإشعاعات اليورانيوم بقدرة هذه الإشعاعات على تأيين جزيئات الهواء كما تفعل أشعة إكس في تجربة تومسون . ولقد دفع هذا التفكير العلماء إلى الربط بين شدة الإشعاعات وكمية التأين في الهواء ولاستخدام كمية التأين كوسيلة قياس لشدة

الإشعاعات . وتم قياس تيار التأين في مختبر كوري بواسطة الإلكتروميتر .

في عام 1899 قام العالم رذرفورد بدراسة خواص الإشعاعات ، ولاحظ أن هناك نوعان من الإشعاعات ، النوع الأول يتم امتصاصه في أجزاء من الألف من سم من الألمنيوم وسماه بأشعة ألفا (α) والنوع الثاني يمتص من قبل سمك يقدر بمئة ضعف السمك الأول وسماه بيتا (β) .

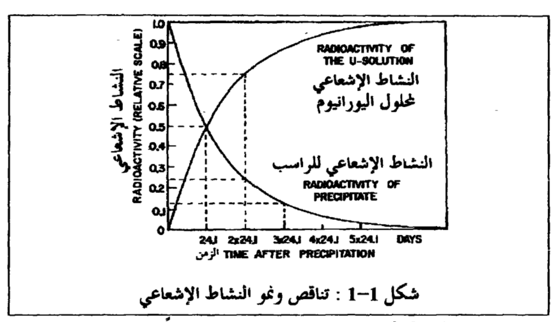
أدت تجارب الانحراف في المجال المغناطيسي والكهربائي على أشعة ألفا وبيتا إلى أنها عبارة عن دقائق تسير بسرعة عالية .

فدقائق ألفا عبارة عن نوى ذرة $^{4}_{2}He^{2+}$ ودقائق بيتا عبارة عن إلكترونات . وربط العلماء بين طبيعة دقائق ألفا وغاز الهيليوم الموجود في خامات اليورانيوم والثوريوم ، وللتأكد من هذا قام العلماء بالتجربة التالية : سمح لدقائق ألفا باختراق وعاء زجاجه رقيق ومفرغ من الهواء وبعد أيام وجد في الوعاء غاز الهيليوم . كما تم اكتشاف أشعة لها خواص الموجات الكهرومغناطيسية وقدرة عالية جداً على الاختراق وطاقة أعلى من أشعة إكس ، سميت بأشعة جاما (γ) .

2-1 التحلل (التفكك) الإشعاعي النووي

Radioactive Decay

توصل العالمان كروكس وبيكوريل من خلال دراستهم للخواص الكيميائية والمشعة لليورانيوم إلى اكتشاف مهم . فعندما تم ترسيب ملح الكربونات من محلول يحتوي على أيونات اليورانيوم UO_2^{2+} بقيت كربونات اليورانيل ذائبة في المحلول إلا أن الراسب كان له نشاط إشعاعي . والأهم من هذا أن النشاط الإشعاعي للراسب تناقص تدريجياً مع الزمن وتزايد للمحلول مع نفس الزمن (الشكل 1-1).



شكل 1–1 : تناقص ونمو النشاط الإشعاعي

ونحن نعرف الآن أن النشاط الإشعاعي المقاس كان ناجماً عن إشعاعات بيتا وجاما وليس ألفا التي تنطلق مباشرة من اليورانيوم . بعد ذلك توصل العالمان رذرفورد وسودي إلى نفس النتيجة السابقة من خلال دراستهم لمحلول الثوريوم ولاحقاً وجد رذرفورد ودورن أنه بالإمكان فصل غازات مشعة من أملاح اليورانيوم والثوريوم . يتناقص النشاط الإشعاعي مع الزمن لهذه الغازات بعد فصلها بينما ينمو نشاط إشعاعي جديد للملح بنفس الطريقة المبينة في شكل (1–1) كما أن سرعة النمو في الملح لا تعتمد على طريقة العمل الكيميائي أو درجة الحرارة ... إلخ . توصل هذان العالمان من خلال هذه الملاحظات إلى أن سبب النشاط الإشعاعي تغيرات في داخل الذرات نفسها وأن ذرات العناصر الأصلية (مثل اليورانيوم U والثوريوم Th) تتحول بسبب التحلل بالنشاط الإشعاعي إلى ذرات لعناصر جديدة .

وسميت العناصر ذات النشاط الإشعاعي بالعناصر المشعة . وللدلالة على العناصر المشعة الناتجة من اليورانيوم والثوريوم استخدمت الأحرف B , A , Z , Y , X مع رمز العنصر الأب ، فمثلاً UX عبارة عن عنصر مشع نتج عن تحلل اليورانيوم بالإشعاع أما ThX فيمثل عنصر مشع نتج عن تحلل الثوريوم المشع . UX و ThX عبارة عن

عنصرين لهما خواص كيميائية مختلفة عن العناصر الأصلية ويمكن فصلهم عنهم بواسطة الطرق الكيميائية مثل الترسيب والتطاير .. إلخ . وتتحلل النظائر المشعة الإبنة أيضاً مكونة عناصر جديدة يرمز لها UY و ThA . تكتب سلسلة التحلل كالآتي :

$Ra \rightarrow Rn \rightarrow RaA \rightarrow RaB \rightarrow$ إلخ

دلت الدراسات الدقيقة على وجود أنواع الإشعاعات الثلاثة المعروفة بألفا (α) وبيتا (β) وجاما (γ) في الإشعاعات المنطلقة من تحلل العناصر المشعة السابقة الذكر . كما أن سرعة التحلل الإشعاعي لكل وحدة كتلة ثابتة لذلك العنصر المشع مهما كانت طبيعته (حالته) الكيميائية أو الفيزيائية . ويتم التعبير عن سرعة التحلل بفترة نصف العُمر والتي تعرف على أنها الفترة الزمنية اللازمة لتحلل نصف عدد ذرات النظير المشع ، ومهما كان عدد الذرات الموجودة منه في البدء ويرمز لها بـ $t_{1/2}$. وتتراوح فترة نصف العُمر للنظائر المشعة المختلفة من أجزاء من الثانية إلى ملايين السنين فمثلاً لـ ThA نصف عمر يساوي 0.1 ثانية و لـ UX $t_{1/2} = 2401$ يوم ولليورانيوم 238 $t_{1/2} = 4.47\times10^{9}$ سنة .

1-3 اكتشاف النظائر والعناصر المشعة الموجودة في الطبيعة

Naturally Occurring Radioactive Substances

تم التعرف بحلول 1910 على 40 مادة كيميائية مختلفة من خلال طبيعتها الكيميائية وخواصها الإشعاعية وفترة نصف العمر الخاصة بكل منها . وبينت العلاقات الجينية الموجودة في تحلل المواد المشعة أنه بالإمكان تقسيم العناصر المشعة إلى ثلاث سلاسل . اثنتان منها تأتي من اليورانيوم والثالثة من الثوريوم . وأثبت العالم بولتدوود أن السلاسل الثلاثة تنتهي بعنصر الرصاص Pb .

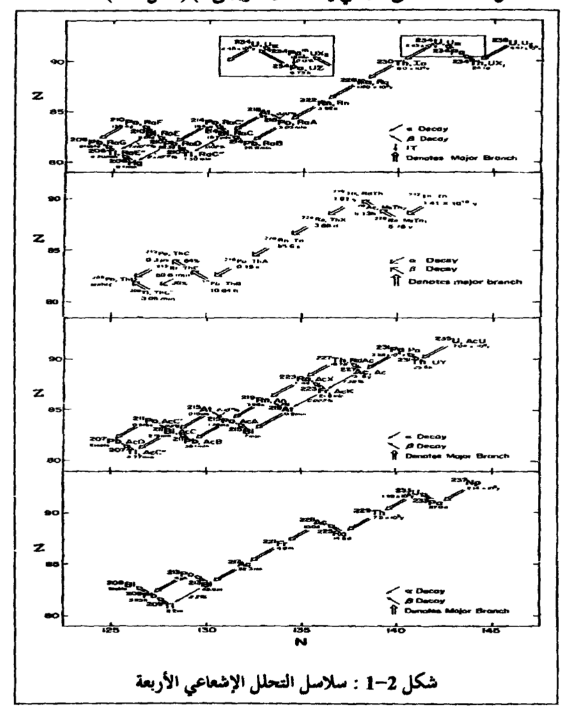
وجد العلماء عند الرجوع إلى الجدول الدوري أن هناك 11 (أحد عشر فراغاً)

ما بين الرصاص واليورانيوم بينما هناك 40 عنصر مشع في سلسلة التحلل من اليورانيوم إلى الرصاص . ومما زاد في تعقيد الأمور صعوبة فصل بعض العناصر المشعة عن بعضها البعض بالطرق الكيميائية المعروفة . فعلى سبيل المثال وجد أن للعنصر المشع RaD نفس خواص Pb الكيميائية . وفي عام 1913 فسر العالمان فاجان وسودي ما سبق بقولهم أن التحلل الإشعاعي بواسطة دقائق ألفا يؤدي إلى عنصر جديد يقع إلى يسار العنصر الأب بفراغين (نقص بمقدار بروتونين) ، أما التحلل بواسطة دقائق β فيؤدي إلى عنصر جديد يقع إلى يمين العنصر الأب بفراغ واحد (شكل 2–1) أي بزيادة بروتون واحد . إن العناصر المشعة التي تقع في نفس المكان في الجدول الدوري (نفس عدد البروتونات) تتمتع بصفات كيميائية مماثلة . أطلق العالم سودي اسم النظائر على العناصر المشعة التي لها نفس الشخصية الكيميائية . ومن ثم أثبت العالم ثومسون وجود النظائر مستخدماً نفس الجهاز الذي استخدمه في قياس $\frac{e}{m}$ للإلكترون وأيونات غاز النيون الموجبة . وتبين له من خلال التجربة أن هناك نوعان من أيونات النيون الموجبة لكل منهما كتلة ذرية خاصة به . فلأحدهم عدد كتلي 20 وللآخر 22 . وإن نسبة وجود النظير 20 حوالي 90٪ أما النظير 22 فنسبته 10٪ .

ويمكننا القول بأن العناصر الكيميائية قد تتكون من أكثر من نوع من الذرات المختلفة عن بعضها في الكتلة الذرية ولكن لها نفس الصفات الكيميائية (نفس عدد البروتونات) . ومن هنا نقول أن العناصر المشعة 40 هي عبارة عن نظائر لإحدى عشر عنصراً كيميائياً مختلفاً . ويكتب النظير كالآتي $^{A}_{Z}X$، حيث أن X ترمز للعنصر بينما A هو العدد الكتلي و Z هو العدد الذري .

وإذا دققنا النظر في السلاسل المشعة ، نجد أن أحدها يأتي من نظير اليورانيوم 238 ^{238}U الذي يمر بـ 14 تحلل (8 منها بإطلاق دقائق α و 6 منها بإطلاق دقائق بيتا) إلى أن

تنتهي السلسلة بنظير الرصاص 206 ^{206}Pb المستقر ويرمز لهذه السلسلة بـ 4n+2 (حيث أن حاصل قسمة 238 على 4 يعطي رقماً صحيحاً ويتبقى 2) (شكل 2–1) .



شكل 2–1 : سلاسل التحلل الإشعاعي الأربعة

أما السلسلة الثانية فهي سلسلة الثوريوم ^{232}Th 232– ، ويرمز لها بـ 4n ، وتنتهي هذه السلسلة بنظير الرصاص ^{208}Pb المستقر . والسلسلة الأخيرة هي سلسلة اليورانيوم – 235 ^{235}U التي تعرف بسلسلة 4n+3 . كما أنها تنتهي بنظير الرصاص المستقر ^{207}Pb .

لاحظ العلماء في السلاسل الثلاثة وجود ما يسمى بالتحلل المتفرع نتيجة التقدم العلمي في أجهزة القياس والكشف ، مما سهل على العلماء إمكانية قياس التحللات الفرعية بدقة أعلى . فعلى سبيل المثال اكتشف في عام 1953 في سلسلة ^{235}U تحلل الفرانسيوم 223 ^{223}Fr إلى راديوم 223 بنسبة 99.995٪ وإلى أستاتين 219 ^{219}At بنسبة 0.005٪ .

كما وجد في كل سلسلة من السلاسل الثلاث نظير لعنصر الرادون (Z=86) وهم ^{219}Rn, ^{220}Rn, ^{222}Rn . والرادون أحد العناصر النبيلة وقد ساعد وجوده في السلاسل على فهم ظاهرة النشاط الإشعاعي ، وذلك من خلال طبيعته الغازية التي أتاحت للعلماء إمكانية فصله ومن ثم الحصول منه على باقي عناصر السلسلة .

4-1 عناصر مشعة أخرى موجودة في الطبيعة .

Other Naturally Occuring Radioactivities

منذ اكتشاف النشاط الإشعاعي تم فحص جميع العناصر الموجودة في الطبيعة لمعرفة إذا كان لديها نشاط إشعاعي أم لا .

فاكتشف العالمان لمبل و وود عام 1906 نشاطاً إشعاعياً ضعيفاً في البوتاسيوم والروبيديوم وبعد ذلك بست وعشرين عاماً اكتشف العالمان هفزي وباهل عام 1932 أن هناك نشاطاً إشعاعياً في السماريوم واكتشف حديثاً عدد من النظائر

المشعة الموجودة في الطبيعة (جدول 1-1) . نرى من الجدول السابق أن النظير المشع لبعض العناصر موجود بنسبة ضئيلة في الطبيعة وفي حالات أخرى تكون فترة نصف العمر للنظير المشع طويلة جداً . هذان العاملان يؤديان إلى نشاط ضعيف للعينة المدروسة مما يصعب عملية الكشف عن هذا النشاط ، ويتوقع العلماء أنه بالإمكان اكتشاف نظائر مشعة أخرى في الطبيعة كلما تقدمت أجهزة الكشف عند النشاط الإشعاعي . ويواجه العلماء مشكلة الإشعاع الطبيعي العام الذي يصعب على العلماء قياس النشاط الإشعاعي الضعيف لبعض العينات .

المادة المشعة Active Substance	نوع التحلل Type of Disintegration	نصف العمر بالسنة Half Life (y)	نسبة النظير Isotopic Abundance(%)	نواتج التحلل المستقرة Stable Disintegration Products
^{40}K	β^-, EC, β^+	1.28×10^{9}	0.0117	^{40}Ca, ^{40}Ar
^{87}Rb	β^-	4.8×10^{10}	27.83	^{87}Sr
^{113}Cd	β^-	9×10^{15}	12.2	^{113}In
^{115}In	β^-	5.1×10^{14}	95.7	^{115}Sn
^{138}La	EC, β^-	1.1×10^{11}	0.089	^{138}Ba, ^{138}Ce
^{144}Nd	α	2.1×10^{15}	23.8	^{140}Ce
^{147}Sm	α	1.06×10^{11}	15.1	^{143}Nd
^{148}Sm	α	8×10^{15}	11.3	^{144}Nd
^{152}Gd	α	1.1×10^{14}	0.20	^{148}Sm
^{176}Lu	β^-	3.6×10^{10}	2.61	^{176}Hf
^{174}Hf	α	2.0×10^{15}	0.16	^{170}Yb
^{187}Re	β^-	4×10^{10}	62.60	^{187}Os
^{190}Pt	α	6×10^{11}	0.013	^{186}Os

جدول 1-1 : عناصر مشعة أخرى موجودة في الطبيعة .

وينتج الإشعاع الطبيعي عن وجود اليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم ... إلخ وعن وجود الأشعة الكونية بشكل أكبر . تصل الأشعة الكونية إلى جميع أنحاء الكرة

الأرضية وتزداد شدتها كلما ارتفعنا إلى أعلى وتقل في الكهوف والمناجم . وفي السنين الأخيرة ازداد الإشعاع الطبيعي العام نتيجة التفجيرات النووية وتسرب الإشعاعات من المحطات النووية مثل تشرنوبل (أوكرانيا) وجزيرة الأميال الثلاثة (الولايات المتحدة) .

1-5 العناصر المشعة المصنعة

Artificially Produced Radioactive Substances

أعلن العالمان أي كوري (أبنة ماري كوري) وف. جوليوت في عام **1934** أنه بالإمكان إكساب البورون والألمنيوم المستقرين نشاطاً إشعاعياً وذلك بقذفهم بدقائق α المنبعثة من البولونيوم المشع .

شكل هذا الاكتشاف بداية لتصنيع النظائر المشعة . كان الهدف الأول من تجربتهم هو إنتاج البوزترون في المختبر وذلك بعد أن اكتشف في الأشعة الكونية من قبل العالم س. أندرسون . ومما أثار دهشتهم أن البورون والألمنيوم المقذوفان بدقائق α استمرا في إطلاق البوزترونات حتى بعد إبعاد مصدر دقائق α (البولونيوم) عنهم، وأن النشاط الإشعاعي المكتسب يتناقص مع الزمن وبنصف عمر $t_{1/2}$ خاص لكل منهما (14 دقيقة للبورون و 3.25 دقيقة للألمنوم) .

بينت الأبحاث في ما بعد أنه قد حصل تفاعل نووي لكل من البورون والألمنيوم ففي البورون حدث ما يلي :

$${}^{10}_{5}B+{}^{4}_{2}\alpha\rightarrow{}^{13}_{7}N+{}^{1}_{0}n$$

ويتحلل نظير ${}^{13}_{7}N$ المشع مطلقاً بوزترونات β^{+} كما يلي :

$${}^{13}_{7}N\rightarrow{}^{13}_{6}C+\beta^{+}$$ ($t_{1/2}$ المقاسة بدقة 9.96 دقيقة)

أما في الألمنيوم فحدث الآتي :

$$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}\alpha \rightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$$

ويتحلل نظير $^{30}_{15}P$ المشع مطلقاً بوزترونات β^{+} حسب المعادلة التالية :

$$^{30}_{15}P \rightarrow ^{30}_{14}Si + \beta^{+}$$

($t_{1/2}$ المقاسة بدقة 2.5 دقيقة)

بعد ذلك سارعت العديد من المختبرات إلى القيام بتجارب مشابهة وذلك بتصميم أجهزة جديدة تهدف إلى تسريع أيونات الهيدروجين والهيليوم الموجبة وإكسابها طاقة كافية لإحداث التفاعلات النووية . وساعد في هذا اكتشاف النيوترون عام 1932 والديتريوم 1933 مما وفر دقيقتان جديدتان ، فاستخدموا كمقذوفات بعد ذلك . ففي غضون 3 سنين ارتفع عدد النظائر المشعة المصنعة إلى 200 وفي غضون 20 سنة التالية ازداد العدد إلى 1000 . ووصل في عام 1978 إلى أكثر من 2500 . وهذا العدد في ازدياد مستمر كل شهر تقريباً .

إن اكتشاف الانشطار النووي في عام 1938 من قبل العالمين هان وستراسمان ساهم بقوة في إنتاج النظائر المشعة . كما أدت المفاعلات النووية التي بنيت فيما بعد إلى إنتاج بعض النظائر المشعة بكميات كبيرة وإلى التوسع في استخدامها في حقول الكيمياء والفيزياء والأحياء والطب والزراعة والهندسة . ملحق أ يحتوي على جميع النظائر المستقرة والمشعة المعروفة .

1-6 العناصر المصنعة وسلسلة 4n+1 المعروفة

Sythetic Elements and the 4n+1 series

لقد تمكن العلماء من تحضير نظائر مشعة للعناصر المعروفة وللعناصر غير المعروفة ، وهذه العناصر غير المعروفة لا توجد أصلاً في الطبيعة ، وفي وقتنا هذا

يمكن تحضير كميات صغيرة من هذه العناصر الجديدة . أما البلوتونيوم فلقد حضر العلماء كميات كبيرة منه تقدر بالكيلوغرامات وذلك لاستخدامه في القنبلة الذرية. وبحلول 2002 بلغ عدد العناصر التي تأتي بعد اليورانيوم ($Z>92$) بـ 20 عنصر، بالإضافة إلى التكنيشيوم ($Z=43$) والبروميثيوم ($Z=61$) .

من العناصر الثقيلة المشعة التي تم تحضيرها عدد لا بأس به من العناصر المشعة المكونة لسلسلة 4n+1 والتي لا توجد في الطبيعة (شكل 2-1) . وبالنظر إلى الشكل (2-1) نرى أن هذه السلسلة تشبه السلاسل الثلاث الأخرى وأنها تنتهي بنظير البزموث المستقر ^{209}Bi . ويعزى عدم وجود هذه السلسلة لنصف عُمر ($t_{1/2}$) ^{237}Np والذي يساوي 2.1×10^6 سنة وهذه المدة الزمنية قصيرة جداً بالمقارنة مع عُمر الكرة الأرضية .

7-1 العناصر السوبر ثقيلة (أو الفوق ثقيلة)

Superheavy Elements

إذا أمعنا النظر في العناصر التي تأتي بعد اليورانيوم نرى أنها ذات نصف عُمر لا يسمح لها بالوجود في وقتنا الحاضر وذلك بالمقارنة بعُمر النظام الشمسي والذي يقدر بعدة بلايين من السنين ، ما عدا نظير ^{244}Pu ($t_{1/2}=8.1\times10^7$ سنة) الذي يوجد بتراكيز صغيرة جداً . وبالنظر إلى قيم نصف العُمر للعناصر السابقة نرى أن نصف العُمر يقل كلما ابتعدنا عن اليورانيوم ، إلا أنه في السنين الأخيرة ظهرت عدة آراء مبنية على حسابات نظرية لبنية النواة تقول بوجود جزيرة استقرار جديدة بعد اليورانيوم وتقع ما بين العدد الذري 110 إلى 114 والعدد الكتلي 300 . جرت محاولات كثيرة للكشف عن هذه العناصر في الطبيعة ولتصنيعها من خلال التفاعلات النووية إلا أن هذه المحاولات باءت بالفشل إلى وقتنا هذا .

الفصل الثاني

بنية النواة وطاقة الربط النووي

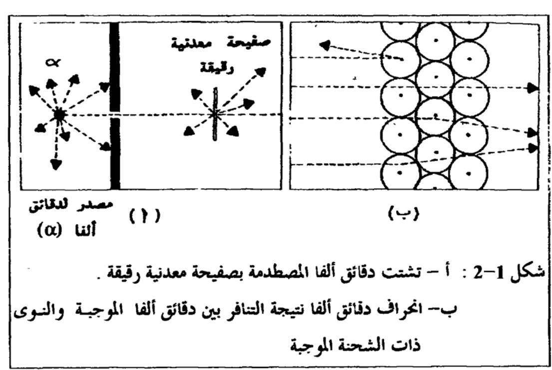
NUCLEAR COMPOSITION AND BINDING ENERGY

2-1 بنية الذرة Atomic Structure

كان التفكير السائد قبل اكتشاف ظاهرة النشاط الإشعاعي أن العناصر الكيميائية تحافظ على هويتها من خلال التغيرات الكيميائية والفيزيائية التي تمر بها. وتبين بعد ذلك أن التحلل بالنشاط الإشعاعي يغير العنصر إلى عنصر آخر . توصل العالم تومسون وعلماء آخرون ،من خلال تجارب التشتت لأشعة أكس وللإلكترونات على المادة ، إلى أن عدد الإلكترونات في كل ذرة يساوي تقريباً الوزن الذري (تبين في ما بعد عام 1911 من قبل العالم باركلا أن عدد الإلكترونات يساوي تقريباً نصف الوزن الذري) وبعد أن قدر تومسون كتلة الإلكترون بـ $\frac{1}{2000}$ من كتلة ذرة الهيدروجين . افترض العلماء أن معظم كتلة الذرة تتركز في منطقة ذات شحنة موجبة . والسؤال المتبقي هو كيف تتوزع الشحنات الموجبة والسالبة داخل الذرة ؟

2-2 تشتت دقائق ألفا Alpha-particle Scattering

قام العالم رذرفورد بتجربة التشتت لدقائق ألفا من قبل صفيحة معدنية رقيقة. وكانت توقعاته أن تمر دقائق α عبر الصفيحة الرقيقة دون أي تغيير في مسارها ، مما يتفق مع الاعتقاد السائد آنذاك بالتوزيع المنتظم للشحنات الموجبة والسالبة في الذرة . وعند البحث تبين أن بعض دقائق ألفا تشتتت بزاوية كبيرة . وكان هذا مبعث دهشة لرذرفورد . وكان الأكثر إثارة للدهشة أن بعض الدقائق انقلبت على أعقابها وانعكس مسارها بصورة كلية ، مما يعني أنها قد اصطدمت بمنطقة موجبة الشحنة ذات كتلة كبيرة نسبياً (الشكل 1-2) .



شكل 1−2 : أ − تشتت دقائق ألفا المصطدمة بصفيحة معدنية رقيقة .

ب− انحراف دقائق ألفا نتيجة التنافر بين دقائق ألفا الموجبة والنوى ذات الشحنة الموجبة

وفيما عدا ذلك فإن معظم دقائق ألفا مرت عبر الصفيحة دون أي تغيير يذكر .

وقد استنتج العالم رذرفورد أن هناك منطقة في الذرة صغيرة جداً ولكن كثافتها عالية وشحنتها موجبة ، وسماها بالنواة وفسر أنواع التشتت السابقة على أساس قوى الجذب والتنافر الإلكتروستاتيكية . فلو افترضنا أن شحنة ذرة الصفيحة المركزية Ze وشحنة دقيقة ألفا ($Z_\alpha e=2e$) على أنهما نقطة مشحونة وأن المسافة بينهما d فتصبح القوة بينهما حسب قانون كولومب $F = Ze \cdot Z_\alpha e / d^2$. وبما أن نواة ذرة الصفيحة (كنواة ذرة الذهب) ثقيلة بما فيه الكفاية أمكننا اعتبارها ثابتة (ساكنة) في لحظة التصادم مع دقائق ألفا المتحركة . وقد بين رذرفورد أن مسار دقيقة ألفا في مجال النواة عبارة عن قطع ناقص وأن النواة في البؤرة الخارجية . وبالاعتماد على قوانين حفظ الزخم والطاقة وعلى الصفات الهندسية للقطع الناقص اشتق العالم رذرفورد معادلة التشتت والتي تربط ما بين عدد n(θ) دقائق ألفا الواقعة على وحدة المساحة والتي تبعد مسافة r عن نقطة

التشتت وزاوية التشتت θ (هي الزاوية التي تقع بين اتجاه السقوط والدقيقة المشتتة) .

$$n(\theta) = n_0 \frac{Nt}{16r^2}\left(\frac{Z_e . Z_{\alpha e}}{\frac{1}{2} M_\alpha V_\alpha^2}\right)^2 \frac{1}{\sin^4\left(\theta/2\right)} \qquad \ldots\ldots (2-1)$$

حيث أن n_0 هو عدد دقائق α الساقطة ، و t هو سمك الصفيحة المعدنية المشتتة و N هو عدد الأنوية في وحدة الحجم للمادة المشتتة و M_α هي كتلة دقيقة α و V_α هي سرعة دقيقة α .

أخضع العالمان جايجر ومارسدن المعادلة (2-1) لعدة تجارب فتبين لهم أن عدد الدقائق المشتتة في وحدة المساحة يتناسب عكسياً مع القوة الرابعة لجيب نصف زاوية التشتت ومع القوة التربيعية لطاقة دقيقة α وذلك في حال أن العناصر الثقيلة هي المكونة للصفيحة المعدنية. أما في حال العناصر الخفيفة فيجب أن ندخل على النظرية التعديل التالي : لا يمكن أن نفترض أن أنوية الصفيحة المعدنية المشتتة ثابتة (ساكنة) في لحظة التصادم .

2-3 شحنة النواة والعدد الذري

Nuclear Charge and Atomic Number

أصبح بالإمكان قياس مقدار الشحنة النووية لذرة عنصر ما من خلال تجارب التشتت وذلك لأن شدة التشتت تتناسب مع مربع الشحنة النووية . وقد أدى هذا إلى الربط ما بين العدد الذري Z المستخدم في تحديد موقع العنصر في الجدول الدوري وشحنة النواة . بعد ذلك وجد العالم هنري موزلي في عام 1914 علاقة طردية بين عدد سماه بالعدد الذري للعنصر وتردد أشعة أكس K_x المنبعثة منه نتيجة اصطدام الإلكترونات بأنود يُعد من العنصر ويستخدم في أنبوب أشعة أكس .

وعرف العدد الذري بأنه عدد وحدات الشحنة في النواة أو هو عـدد الإلكترونـات في الذرة المتعادلة والموجـودة خـارج النـواة . بعـد ذلـك تـابع العلمـاء مـن بـور إلى شرودنغر إلى هايزنبرغ دراساتهم لفهم الذرة وتركيبها .

2-4 بنية النواة Composition of Nuclei

أ) كثافة وحجم النواة Nuclear Size and Density

توصل العلمـاء مـن خـلال تجـارب رذرفـورد إلى معرفـة أحجـام الأنويـة وأن قطرها يقع في حدود 10^{-12}سـم ، أي أنهـا 10^{-4} مـرة أصغـر مـن الـذرة . وبمـا أن النواة تحتوي على كتلة الـذرة فـإن كثافتهـا أكـبر بكثـير مـن كثافـة المـواد المعروفـة وتساوي تقريباً 10^{14}غم/سم^{3} (أو 10^{8}طن/سم^{3}) .

ب) فرضية الإلكترون - البروتون Proton-Electron Hypothesis

بما أن شحنات الأنوية هي مضاعفات (أرقام) صحيحة وأن الكتل هي مضاعفات لشحنة وكتلة البروتون تقريباً ، كان من الطبيعي أن يفـترض العلمـاء بـأن جميـع الأنويـة مبنية من البروتونات . اعتقد العلماء قبل اكتشاف النيوترونـات بـأن العـدد الكتلـي A لذرة ما يساوي عدد البروتونات (للدلالة على الكتلة) و (A-Z) هو عدد الإلكترونـات (للدلالة على الشحنة الموجبة) . نجم عن هذه الفرضية عدة مشاكل منها مسـئلة وجـود الإلكترون في النواة ، فإذا وجد في النواة كان له طول موجة دي بروغلي $\left(\lambda = \frac{h}{mv}\right)$ والذي يساوي قطر النواة أو أصغر منه . فالطاقة الحركيـة المحسـوبة علـى هـذا الأسـاس تساوي أكثر من طاقة دقائق بيتا المنطلقة من النواة . مما جعل العلماء أن يصرفـوا النظـر عن فكرة وجود الإلكترونات الـحُرة في النواة وأن يفكروا بوجود دقيقة جديـدة سماهـا رذرفورد عام 1920 بالنيوترون مكونة من بروتون وإلكترون .

جـ) اكتشاف النيوترون Neutron Discovery

قام العلماء بعدة محاولات فاشلة لإثبات وجود النيوترون بعد عام 1920 إلى أن جاء العالم شادوك عام 1932 وأثبت أن الدقائق الناتجة والمنطلقة بسرعة من تفاعل دقائق α والبورون هي نيوترونات ذات شحنة تساوي صفر وكتلة مساوية تقريباً لكتلة البروتون (أكثر من كتلة ذرة الهيدروجين بحوالي 0.08٪) . وبما أن النيوترونات متعادلة الشحنة فإنها لا يمكن أن تأين المواد نتيجة مرورها بها وأن ما يحدث هو عملية تصادم كتلي بينها وبين الذرات القريبة في الكتلة منها مثل ذرات الهيدروجين ، ولقد استدل العلماء على هذا بعد أن مرت النيوترونات في شمع البرافين ونتج عن ذلك غاز الهيدروجين .

لا يمكن للنيوترونات أن توجد حرة فهي غير مستقرة وتتحلل إلى بروتونات وإلكترونات (فترة نصف العمر 11 دقيقة) .

د) فرضية البروتون - النيوترون Proton-Neutron Hypothesis

جاءت هذه الفرضية بعد فشل فرضية الإلكترون – البروتون . فالفرضية الجديدة تقول بأن عدد البروتونات في النواة يساوي العدد الذري (Z) وأن عدد البروتونات والنيوترونات الكلي (عدد النيوكليون) يساوي العدد الكتلي A (النيوكليون تعبير يعني بروتوناً أو نيوتروناً) . فنواة ^{14}N تحتوي على سبع بروتونات وسبع نيوترونات .

تمتد الأعداد الذرية للعناصر المعروفة من 1 للهيدروجين إلى 109 لأثقل عنصر في الجدول الدوري . أما عدد النيوترونات فيتراوح ما بين 0 إلى 159 والعدد الكتلي من 1 إلى 263 .

يسمى الفرق ما بين عدد النيوترونات وعدد البروتونات N-Z أو (A-2Z) بالزيادة النيوترونية (أو الرقم النظيري) .

هـ) النظائر والنوى Isotopes and Nuclides

تعرف النظائر بأنها ذرات عنصر واحد تختلف عن بعضها البعض في عدد النيوترونات . فعلى سبيل المثال لليورانيوم في الطبيعة نظيران مشعان يُعبر عنهما الرمزان $^{235}_{92}U$ و $^{238}_{92}U$

وباستخدام أجهزة مطياف الكتلة أثبت أن العناصر ما بين Z = 1 و 83 لها في المعدل أكثر من ثلاثة نظائر ، فعلى سبيل المثال للعناصر التالية البريليوم ، الفسفور ، الزرنيخ والبزموث نظير مستقر واحد في الطبيعة أما القصدير فله 10 نظائر مستقرة في الطبيعة .

توجد نظائر العنصر المستقرة بنسب ثابتة مع بعضها البعض ، ولهذا فإن الأوزان الذرية المقاسة لعنصر ما باستخدام مصادر أو عينات مختلفة تتفق مع بعضها البعض ضمن الخطأ في التجارب . وقد شذت حالتان عن هذه القاعدة ، أولهما نسبة وجود نظائر الرصاص المتغيرة وخاصة في خامات اليورانيوم والثوريوم . فبالاعتماد على عمر ومكونات الخامة فإن نهايات السلاسل المشعة الثلاثة ^{206}Pb و^{207}Pb و ^{208}Pb والنظير ^{204}Pb ، الذي لا يأتي من مصدر مشع ، قد تتواجد بنسب مختلفة . وثانيها نسبة النظير ^{87}Sr الذي يتواجد بنسبة عالية في الصخور التي تحتوي على الربيديوم وذلك لأن ^{87}Sr ينتج أيضاً عن تحلل ^{87}Rb الطبيعي المشع . أما ثالثها فهو اختلاف نسبة $\frac{{}^{4}_{2}He}{{}^{3}_{2}He}$ في حقول الغاز الطبيعي مع تلك الموجودة في الجو . ورابعها نسبة $^{2}H/^{1}H$ في الماء ، ويعزى هذا إلى انخفاض ضغط بخار الماء الثقيل بالمقارنة مع الماء العادي . فمياه البحر الميت تحتوي على نسبة أعلى من الديتريوم ^{2}H . فالمياه التي تحتوي على نسبة من ^{2}H أعلى من الطبيعي وجد أنها تحتوي على نسبة أعلى من الطبيعي لـ $\frac{^{18}O}{^{16}O}$. والسبب الآخر الذي يساعد في الاختلاف القليل في نسبة النظائر هو اعتماد الاتزان على الأوزان الجزيئية للمتفاعلات مما قد يؤدي إلى زيادة في نسبة أحد النظائر من خلال التفاعلات في الطبيعة . فتزداد نسبة ^{13}C في الحجر الجيري نتيجة الاتزان في التفاعل التالية :

$$CO_2 + H_2O \Leftrightarrow HCO_3^- + H^+$$

يُزاح إلى اليمين أكثر في حال $^{13}CO_2$ منه في حال $^{12}CO_2$.

استخدم العلماء تعبير النظير بشكل واسع للدلالة على أي نويدة مشعة أم مستقرة . وفي الآونة الأخيرة درج اسم النويدة بشكل أوسع للدلالة على ذرة نواتها تحتوي على عدد معين من البروتونات والنيوترونات .

و) إيزوبارز وإيزوتونز وإيزومرز

Isobars, Isotones and Isomers

تسمى الذرات التي لها نفس العدد الكتلي ولكنها تختلف بالعدد الذري بالأيزوبارز ومن الأمثلة على ذلك $^{76}_{34}Se$ ، $^{76}_{32}Ge$ و $^{130}_{56}Ba$ ، $^{130}_{54}Xe$ ، $^{130}_{52}Te$. أم الذرات التي لها نفس عد النيوترونات ولكنها تختلف في العدد الكتلي بالأيزوتونز ومن الأمثلة على ذلك $^{30}_{14}Si$ ، $^{31}_{15}P$ ، $^{32}_{16}S$ حيث أن عدد النيوترونات في كل منها 16 .

اكتشف العالم هاهن في 1922 أن هناك ذرتان مشعتان UX_2 وUZ في سلسلة $^{238}_{92}U$ المشعة ، لهما نفس العدد الكتلي (234) والعدد الذري (91) ولكنها تختلف في الخواص الإشعاعية (شكل 2-1) . سميت هاتان الذرتان بالأيزومرز وهذه الخاصية بالأيزومرزم . بعد ذلك بـ 15 عاماً اكتشف في ^{80}Br هذه الخاصية ومن ذلك الوقت اكتشف العلماء أن هناك 500 زوج من الأيزومرز . وفسر العلماء هذه الخاصية على أساس وجود النواة في مستويات طاقة مختلفة في كل من الأيزومرز ، كما أن لكل مستوى طاقة وفترة حياة خاصة به ما عدا المستوى الأرضي إذا كان مستقراً . ومن ثم تبين للعلماء أن هناك بعض الحالات التي يوجد فيها أكثر من زوج من الأيزومرز مثل $^{124}Sb^{(g)}$ ($t_{1/2}$ = 60 يوم) ، $^{124}Sb^{m1}$ ($t_{1/2}$ = 1.6 دقيقة) و $^{124}Sb^{m2}$ ($t_{1/2}$ = 20 دقيقة) ، وترمز g للمستوى الأرضي أما m_1 فترمز لطاقة تهيج المستوى الأيزومري الأول و m_2 لطاقة تهيج المستوى الأيزومري الثاني . أي أن طاقة m_2 هي أكثر من طاقة m_1 و m_1 أكثر من طاقة g.

2-5 أنماط الاستقرار النووي Nuclear Stability

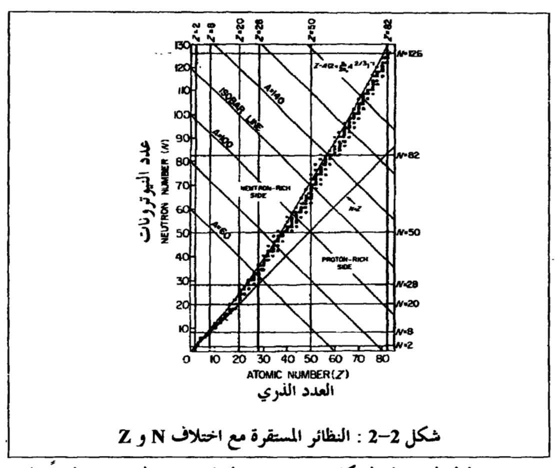
هناك حوالي 275 نواة مختلفة لم تظهر أي نشاط إشعاعي ولهذا اعتبرت مستقرة نحو التحلل بالنشاط الإشعاعي . وعند النظر إلى أنويتها (نوى) تبين أن 60٪ منها تحتوي على عدد زوجي من البروتونات وعدد زوجي من النيوترونات (زوجي – زوجي) أو (even-even) باللغة الإنجليزية التي تختصر إلى (e-e) . أما 40٪ المتبقية فتنقسم تقريباً بالتساوي ما بين نوى لها عدد زوجي من البروتونات وعدد فردي من النيوترونات (even-odd أو e-o) ونوى لها عدد فردي من البروتونات وعدد زوجي من النيوترونات (odd-even أو o-e) . وهناك فقط ست نوى لها عدد فردي من البروتونات والنيوترونات (odd-odd أو o-o) وهي $^{2}_{1}H$ و $^{6}_{3}Li$ و $^{10}_{5}B$ و $^{14}_{7}N$ و $^{50}_{23}V$ و $^{180}_{73}Ta$ ومن الملاحظ أن النوى الأربع الأولى من العناصر الخفيفة وأن لها نسبة وجود في الطبيعة تتراوح من 0.0148٪ لـ $^{2}_{1}H$ و 7.5٪ لـ $^{6}_{3}Li$ و19.8٪ لـ $^{10}_{5}B$ إلى 99.63٪ لـ $^{14}_{7}N$. أما $^{50}_{23}V$ فله نسبة وجود 0.250٪ ولـ $^{180}_{73}Ta$ نسبة وجود 0.01٪ .

ويلاحظ مما سبق أن النوى التي لها عدد زوجي من البروتونات والنيوترونات تتمتع باستقرار أكثر من تلك التي لها عدد فردي من البروتونات أو النيوترونات . ومن أجل التأكد من صحة هذا وجب علينا دراسة بعض العناصر وعدد نظائرها المستقرة (جدول 1–2) . للعناصر ذات العدد الذري الزوجي عدد من النظائر المستقرة لا يقل عن أربعة ، فعلى سبيل المثال ، لعنصر القصدير (Z = 50) عشر نظائر مستقرة أما الكادميوم (Z = 48) والتيريليوم (Z = 52) فلكل منهما ثمان نظائر مستقرة . ونجد في المقابل أن للفضة (Z = 47) وللأنتيمون (Z = 51) نظيران مستقران فقط . وأن للروديوم (Z = 45) وللإنديوم (Z = 49) ولليود (Z = 53) نظير مستقر واحد .

عدد البروتونات أو النيوترونات Number of protons or neutrons	عدد النوى المستقرة التي لها عدد Number of stable nuclei with number of	
	نظائر Protons (isotopes)	أيزوتونات Neutrons (isotones)
19	**2 (K)**	**0**
20	**6 (Ca)**	**5**
21	**1 (Sc)**	**0**
27	**1 (Co)**	**1**
28	**5 (Ni)**	**5**
29	**2 (Cu)**	**1**
48	**8 (Cd)**	**4**
49	**1 (In)**	**1**
50	**10 (Sn)**	**5**
51	**2 (Sb)**	**1**
52	**8 (Te)**	**4**
81	**2 (Tl)**	**1**
82	**4 (Pb)**	**8**
83	**1 (Bi)**	**1**

جدول 1–2 : عدد النوى المستقرة لأعداد مختلفة من N و Z .

وهناك عدة أمثلة على الاستقرار الزائد الذي ينتج عن وجود عدد زوجي من النيوكليونز (شكل 2–2) وإذا أمعنا النظر في الشكل (2–2) نرى أن عدد النظائر المستقرة يزداد عند N و Z 2 ، 8 ، 20 ، 28 ... إلخ. إن هذه الأعداد لـ N و Z لم تأتي من فراغ بل تمثل تركيب نووي مستقر للبروتونات والنيوترونات والذي سوف يدرس فيما بعد .



شكل 2–2 : النظائر المستقرة مع اختلاف N و Z

إن الخط المنحني في الشكل (2–2) هو خط الاستقرار المحسوب نظرياً على أساس نموذج قطرة السائل للنواة والذي سوف نتطرق له لاحقاً .

نجد أن للعناصر ذات العدد الفردي من البروتونات نظير أو نظيران مستقران، لأحدهما أو لكلاهما عدد زوجي من النيوترونات وعدد النظائر المستقرة ذات العدد الزوجي من البروتونات والعدد الزوجي من النيوترونات أكثر من تلك التي لها عدد زوجي من البروتونات وعدد فردي من النيوترونات ، فعلى سبيل المثال للقصدير Sn ‏(Z = 50) سبعة نظائر مستقرة من نوع زوجي – زوجي (e-e) وثلاثة من نوع زوجي – فردي (e-o) . كما نجد أيضاً أن للنوى ذات العدد الزوجي من النيوترونات نظير أو نظيران مستقران . وقد فسر العلماء الاستقرار

الناجم عن العدد الزوجي من البروتونات والنيوترونات على أساس طاقة الاستقرار الناجمة عن تكوين أزواج من النيوكليونز المتشابهة تماماً كما يحدث في الذرة عندما تكون الإلكترونات أزواجاً . فإذا كان في النواة عدد زوجي من البروتونات فإنه يمكن أن تتواجد على شكل أزواج . أما إذا كان عدد البروتونات فردي فإنه لابد أن يوجد أحد البروتونات في الحالة المنفردة أو غير المزدوجة .

ساهمت الزيادة في الاستقرار الناجمة عن وجود البروتونات الزوجية على هيئة أزواج في قابلية العناصر على استيعاب مدى أكبر من النيوترونات وهذا ما حصل في نظائر القصدير بالمقارنة مع الأنديوم والأنتيمون . كما أن وجود النيوترونات على هيئة أزواج يساهم في الاستقرار ، فالنواة ذات العدد الزوجي – الزوجي يكون فيها جميع البروتونات والنيوترونات على شكل أزواج وهذا يعني أنها في حالة استقرار . وفي العناصر ذات العدد الذري الزوجي وعدد النيوترونات الفردي نوع من الاستقرار الناجم عن وجود أواج من البروتونات ، أما العناصر ذات العدد الذري الفردي فلا بد أن يأتيها الاستقرار من عدد النيوترونات ، فإذا كان عددها زوجي كانت مستقرة ، أما إذا كان العدد فردياً كانت ذات نشاط إشعاعي إلا في بعض الحالات النادرة الست التي تم ذكرها .

ومن الملفت للنظر أن عدد النوى المستقرة من نوع زوجي – فردي (e-o) وفردي – زوجي (o-e) متساوٍ تقريباً وهذا يعني أن تزواج البروتونات أو النيوترونات يؤدي إلى نفس الدرجة من الاستقرار تقريباً .

2-6 نسبة النيوترونات إلي البروتونات

Neutron to Proton Ratio

نلاحظ من الشكل (2–2) ، الذي يمثل العلاقة ما بين عدد النيوترونات وعدد البروتونات في النوى المستقرة ، أن الاستقرار في العناصر الخفيفة يحدث عندما يتساوى تقريباً عدد البروتونات والنيوترونات (N=Z) وذلك من Z=1 إلى Z=20 ، وإذا تجاوزنا Z=20 نجد دائماً أن عدد النيوترونات أعلى من عدد البروتونات ، وأن نسبة النيوترونات إلى البروتونات في النظائر المستقرة تزداد إلى أن تصل 1.5 في البزموث في أعلى حزمة الاستقرار . فكل النوى التي تأتي بعد البزموث غير مستقرة نحو التحلل الإشعاعي بدقائق ألفا وأن بعض هذه النوى غير مستقرة نحو التحلل بدقائق بيتا أيضاً .

وقد فسر هذا لاحقاً على أساس زيادة عدد البروتونات يتبعه زيادة في قوى التنافر بينها في داخل النواة ، مما يستدعي وجود نيوترونات أكثر للتغلب على قوى التنافر وللإبقاء على وحدة النواة . والنظائر الواقعة خارج حزمة الاستقرار هي نظائر مشعة تتحلل لتعطي نوى تمتلك نسبة مستقرة من النيوترونات إلى البروتونات. فالنظائر الواقعة فوق حزمة الاستقرار لديها $\frac{N}{Z}$ أعلى من نسبة الاستقرار ولهذا تسمى نظائر غنية بالنيوترونات ويتحتم عليها أن تفقد نيوترونات أو أن تقلل النيوترونات وتزيد البروتونات . ومن هنا يفسر تحلل نظير اليود – 137 بخسارة نيوترون :

$$^{137}_{53}I \rightarrow ^{136}_{53}I + ^{1}_{0}n$$

كما أن تحلل نظير الكربون – 14 يتم بتحول أحد النيوترونات في $^{14}_{6}C$

$$^{14}_{6}C \rightarrow ^{14}_{7}N + ^{0}_{-1}e$$

إلى بروتون في $^{14}_{7}N$

$$^{1}_{0}n \rightarrow ^{1}_{1}P + ^{0}_{-1}e$$

ويحدث العكس في النظائر الواقعة تحت حزمة الاستقرار ، حيث أن نسبة $\frac{N}{Z}$ أقل من نسبة الاستقرار وتسمى نظائر غنية بالبروتونات ، فتتحلل هذه النظائر من أجل أن ينقص عدد البروتونات ويزداد عدد النيوترونات ، فإما أن تتحلل بإطلاق بوزيترون (إلكترون ذو شحنة موجبة) $^{0}_{+1}e$ كما في تحلل النظير ^{11}C :

$$^{11}_{6}C \rightarrow ^{11}_{5}B + ^{0}_{+1}e \qquad \left(^{1}_{1}P \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{0}_{+1}e\right)$$

أو بالتقاط أحد إلكترونات الذرة الموجودة في مستوى K أو L وتسمى هذه العملية اقتناص الإلكترون EC (Electron Capture) كما في المثال التالي :

$$^{7}_{4}Be \xrightarrow{EC} ^{7}_{3}Li$$

فيتحول بروتون إلى نيوترون :

$$^{1}_{1}P + ^{0}_{-1}e \rightarrow ^{1}_{0}n$$

هناك تنافس بين إطلاق البوزترون واقتناص الإلكترون ، وتزداد احتمالية اقتناص الإلكترون كلما ازداد العدد الذري .

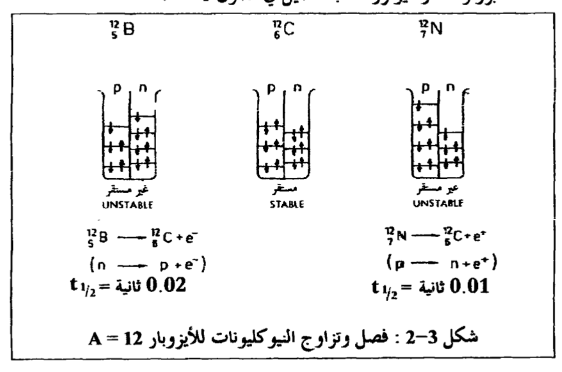
ففي بداية الجدول الدوري تتحلل النوى بإطلاق البوزترون إلى أن نصل إلى منطقة البلاتين حيث تزداد احتمالية التحلل باقتناص الإلكترون وتصبح المسيطرة بعد ذلك . أما في وسط الجدول الدوري فنرى النظائر تتحلل بالطريقتين .

والبديل لهاتين الطريقتين هو إطلاق البروتون الذي لوحظ بندرة في حوالي 40 نواة بعيدة عن حزمة الاستقرار . وفترة نصف العمر لهذه النوى ≤ 30 ثانية . ومن الأمثلة على ذلك ($t_{1/2}$ = 18 ث) ^{115}Xe (النسبة بين إطلاق البروتون / E.C = 3×10^{-3}) .

إن الزيادة في النسبة $\frac{N}{Z}$ مع الازدياد في العدد الذري في حزمة الاستقرار عائد لوجود قوى التنافر الإلكتروستاتيكية (قوى كولومب) بين البروتونات جميعها في النواة . فوجود قوى مستقرة يعني أن هناك قوى تجاذب تربط البروتونات والنيوترونات مع بعضها البعض بحيث تفوق وتتغلب على قوى التنافر المدمرة للنواة

والعكس صحيح . فكلما ازداد عدد البروتونات ازدادت قوى التنافر الكلية ومن أجل أن تكون هناك قوى تجاذب كافية للاستقرار وجب زيادة عدد النيوترونات بسرعة أكبر من الزيادة في عدد البروتونات .

افترض العلماء أن النيوترونات والبروتونات موجودة في أفلاك نيوكلونية منفصلة تماماً كالإلكترونات في الذرة ، فإذا كان عدد النيوترونات أعلى بكثير من عدد البروتونات فإن أفلاك النيوترونات الممتلئة ستمتد إلى مستوى طاقة أعلى من تلك التي وصلت إليها أفلاك البروتونات الممتلئة . وهذا سيؤدي إلى زيادة في استقرار النواة عندما يتحول نيوترون في أعلى فلك نيوتروني إلى بروتون في فلك بروتوني طاقته أقل (شكل 3–2) . وسندرس موضوع القوى النووية ومستويات الطاقة للبروتونات والنيوترونات بالتفصيل في فصول لاحقة .



شكل 3–2 : فصل وتزاوج النيوكليونات للأيزوبار A = 12

2-7 الفرق الكتلي Mass Defect

إذا استخدمنا كتلة نظير الكربون – 12 كأساس لقياس كتل ذرات العناصر والدقائق ، فإننا نجد أن كتلة ذرة الهيدروجين وكتلة النيوترون لا تساوي وحدة كتلة ذرية (و.ك.ذ = $\frac{1}{12}$ كتلة ذرة ^{12}C). إن كتلة ذرة لها عدد كتلي A تساوي M_A وهذه تساوي عدد البروتونات (Z) مضروباً بكتلة ذرة الهيدروجين (M_H) زائد عدد النيوترونات (N) مضروباً بكتلة النيوترون (M_n) ، أي أن :

$$M_A \approx Z\,M_H + N\,M_n \qquad (2-2)$$

وعلى هذا الأساس يمكننا أن نحسب كتلة الهيليوم ^4_2He على النحو التالي :

$$= 2M_H + 2M_n$$

$$= 2(1.007825) + 2(1.008665) = \text{4.0329801 و.ك.ذ}$$

أما كتلة الهيليوم ^4_2He المقاسة فإنها 4.0026033 و.ك.ذ أي أن الفرق الكتلي

$$\Delta M_A = ZM_H + NM_n - M_A \qquad (2-3)$$

هو $\Delta M_A = 4.0329801 - 4.0026033 = $ 0.0303768 و.ك.ذ

فعندما تتكون ذرة ^4_2He ، فإن ما يكافئ 0.0303768 و.ك.ذ ينطلق على صورة طاقة يمكن أن تحسب قيمتها على أساس مول واحد من ذرات ^4_2He من معادلة أينشتاين المشهورة :

$$E = mC^2 \qquad (2-4)$$

حيث C = سرعة الضوء م/ث و m = الكتلة كغم .

$E = $ كغم 0.030378×10^{-3} (م/ث $2.9979\times10^{8})^2$

$= 2.7302\times10^{12}$ كغم.م²/ث²

وبما أن الجول = 1 كغم.م²/ث² ، فإن : $E = $ 2.7302×10^{12} جول/مول

$= $ 2.7302×10^{9} كيلوجول/مول

ولأغراض المقارنة ، فإن طاقة احتراق مول من CH_4 تساوي 8.9×10^2 كيلوجـول/مول ، أي أن الطاقة المنطلقة من 1 مول من ذرات ^4_2He أكبر بكثير من طاقة الاحتراق .

ومـن علاقـة أينشـتاين نجـد أن كـل و.ك.ذ = 931.5023 مليـون إلكـترون قولت (MeV) كما يلي : الطاقة المكافئة لوحدة كتلة ذرية هي :

$$E = \text{غم } 1.660566\times10^{-24} \left(\frac{\text{سم}}{\text{ث}} 2.9979246\times10^{10}\right)^2$$

$$= \text{إرغ } 1.492442\times10^{-3}$$

وتستخدم هنا وحدة طاقة تسمى بالإلكترون قولت .

واحد إلكترون قولت (1eV) = 1.602189×10^{-12} إرغ

و 1eV/جزيء = 23.045 كيلوكالوري/مول = 96.48 kJ/مول .

أي أن الطاقة المكافئة لوحدة كتلة ذرية بوحدة الإلكترون قولت هي :

$$E = \text{إلكترون قولت } 931.502\times10^6$$

أو

$$E = \text{MeV } 931.502$$

أي أن الفرق الكتلي لـ ^4_2He =

MeV 28.2960 = 931.502 × و.ك.ذ 0.0303768

والفرق الكتلي لديوتيريوم هو MeV 2.224 ، وقد لاحـظ العلمـاء انطـلاق هذه الطاقة عند إمساك الـبروتون لنيوتـرون قليـل الطاقـة . ومـن التعريـف السـابق للفرق الكتلي ΔM_A نجد أن لجميع النظائر المستقرة قيم موجبة (انظر الملحق أ) .

ويستخدم بعض العلماء الزيادة في الكتلة Mass Excess والتي يرمـز لهـا Δ وتُعرف على أنها الفرق بين الكتلة الذرية المقاسة والعدد الكتلي .

$$\Delta_A = M_A - A \qquad (2-5)$$

وتُعطى قيم Δ بوحدة و.ك.ذ أو eV ، يبين الجدول (2–2) قيم الكتل الذرية والفروق الكتلية والزيادة في الكتلة لبعض النظائر .

العنصر Element	Z	N	A	الكتلة الذرية Atomic mass M_A (u)	الزيادة في الكتلة Δ Mass excess M_A-A (μu)	فرق الكتلة Mass defect ΔM_A (μu)	طاقة الربط Binding energy E_B (MeV)	طاقة الربط / نيوكليون E_B/A (MeV / nucleon)
n	0	1	1	1.008 665	8 665	0	-	-
H	1	0	1	1.007 825	7 825	0	-	-
D	1	1	2	2.014 102	14 102	2 388	2.22	(2.22)
T	1	2	3	3.016 049	16 049	9 106	8.48	2.83
He	2	1	3	3.016 030	16 030	8 285	7.72	2.57
He	2	2	4	4.002 604	2 604	30 376	28.29	7.07
He	2	4	6	6.018 893	18 893	31 417	29.26	4.87
Li	3	3	6	6.015 126	15 126	34 344	31.99	5.33
Li	3	4	7	7.016 005	16 005	42 130	39.24	5.60
Be	4	3	7	7.016 929	16 929	40 366	37.60	5.37
Be	4	5	9	9.012 186	12 186	62 439	58.16	6.46
Be	4	6	10	10.013 535	13 535	69 755	64.97	6.49
B	5	5	10	10.012 939	12 939	69 511	64.74	6.47
B	5	6	11	11.009 305	9 305	81 810	76.20	6.92
C	6	6	12	12.000 000	0 000	98 940	92.15	7.67
N	7	7	14	14.003 074	3 074	112 356	104.6	7.47
O	8	8	16	15.994 915	-5 085	137 005	127.6	7.97
F	9	10	19	18.998 405	-1 595	158 670	147.8	7.77
Ne	10	10	20	19.992 440	-7 560	172 460	160.6	8.03
Na	11	12	23	22.989 771	-10 229	200 284	186.5	8.11
Mg	12	12	24	23.985 042	-14 958	212 838	198.2	8.25
Al	13	14	27	26.981 539	-18 461	241 496	224.9	8.33
Si	14	14	28	27.976 929	-23 071	253 931	236.5	8.44
P	15	16	31	30.973 765	-26 235	282 250	262.9	8.48
K	19	20	39	38.963 710	-36 290	358 265	333.7	8.56
Co	27	32	59	58.933 189	-66 811	555 366	517.3	8.77
Zr	40	54	94	93.906 133	-93 867	874 777	814.8	8.67
Ce	58	82	140	139.905 392	-94 608	1 258 988	1172.7	8.38
Ta	73	108	181	180.948 007	-51 993	1 559 038	1452.2	8.03
Hg	80	119	199	198.968 279	-31 721	1 688 856	1573.0	7.90
Th	90	142	232	232.038 124	38 124	1 896 556	1766.6	7.62
U	92	144	236	236.045 637	45 637	1 922 202	1791.0	7.59
U	92	146	238	238.050 770	50 770	1 934 220	1801.7	7.57
Pu	94	146	240	240.053 882	53 882	1 946 758	1813.4	7.56

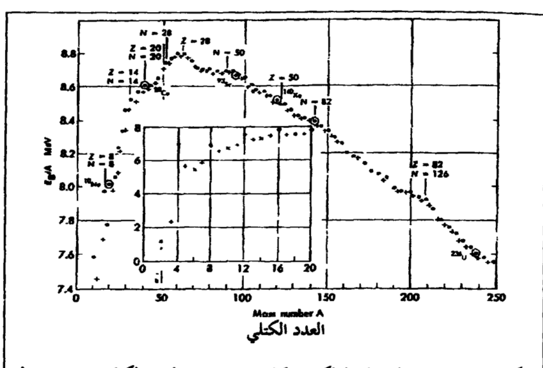
جدول 2–2 : الكتل الذرية وطاقات الربط .

2-8 طاقة الربط النووي Nuclear Binding energy

عند حرق الهيدروجين في الأوكسجين في الحالة الغازية تحت ضغط جوي ، فإن التفاعل يسير بشكل تلقائي بمجرد أن نبدأ التفاعل ويؤدي إلى تكون الماء وإنتاج كمية كبيرة من الطاقة الحرارية ، فالتفاعل طارد للحرارة . وأثناء التفاعل تتحول طاقة الوضع إلى طاقة حرارية ، فتقل طاقة الوضع نتيجة لذلك ، وتصل الحالة إلى الاستقرار ، كما أن الطاقة المنطلقة عند تكون نواة ما من عدد من ذرات الهيدروجين وعدد من النيوترونات مقياس لاستقرار النواة ، وتسمى هذه الطاقة بطاقة الربط ، والتي تعرف أيضاً على أنها الطاقة اللازمة لتفكيك النواة إلى مكوناتها الأساسية (ذرات هيدروجين ونيوترونات) . فطاقة الربط للهيليوم 28.296 MeV وللديوتيريوم 2.224 MeV ، أي أن طاقة الربط E_B تساوي قيمة الفرق الكتلي بوحدة وحدة الكتلة الذرية مضروباً بمعامل التحويل $931.5 \frac{MeV}{\text{و.ك.ذ}}$.

$$E_B = 931.5 \times \Delta M_A \qquad (2-6)$$

كما استدل العلماء على استقرار النواة من قيمة طاقة الربط لكل نيوكليون والتي تساوي طاقة الربط بوحدة المليون إلكترون فولت مقسومة على العدد الكتلي لتلك النواة ويرمز لها $E_{B/A}$ فقيمة $E_{B/A}$ للهيليوم تساوي $\frac{28.3}{4} = 7.1$ MeV بينما للديوتيريوم = $\frac{2.22}{2} = 1.11$ MeV . لهذا فإن نواة ^4_2He أكثر استقراراً من نواة الديوتيريوم . تقع قيم $E_{B/A}$ لمعظم النوى بين 5 و 9 مليون إلكترون فولت (شكل 2–4) . أي أن $E_{B/A}$ تقريباً ثابتة وهذا يعني أن طاقة الربط النووي تتناسب طردياً مع عدد النيوكليونز (A) في النواة .



شكل 4–2 : علاقة طاقة الربط لكل نيوكليون $E_{B/A}$ مع العدد الكتلي A ترمز ● إلى زوجي–زوجي و + إلى فردي–زوجي وزوجي–فردي و × إلى فردي–فردي أيزوبار

نلاحظ من الشكل (4–2) أن $E_{B/A}$ تزداد مع ازدياد العدد الكتلي حتى تصل أعلى قيمة لها عند A=60 ومن ثم تتناقص مع ازدياد العدد الكتلي . فالنوى التي تقع في منطقة A=60 كالنيكل والحديد أكثرها استقراراً . ويبين الشكل السابق أعداد النيوترونات والبروتونات التي تكون تراكيب نووية مستقرة على شكل نتوئات صغيرة في المنحنى .

إذا اندمجت نواتان لتكون نواة جديدة لها $E_{B/A}$ أعلى من $E_{B/A}$ للنواتين المندمجتين انطلقت كمية من الطاقة . وتسمى هذه العملية بالاندماج النووي Fusion ، وهي مطلقة للطاقة وتحدث عندما يكون للنوى عدد كتلي أقل من 60، فعلى سبيل المثال

$${}^{20}_{10}Ne + {}^{20}_{10}Ne \rightarrow {}^{40}_{20}Ca$$

فقيمة $E_{B/A}$ لـ $^{20}_{10}Ne$ من الشكل (2–4) حوالي 8.0 MeV ولـ $^{40}_{20}Ca$ حوالي 8.6 MeV . أي أن طاقة الربط لنواتي $^{20}_{10}Ne$ تساوي 320 MeV .

$2 \times 20 \times 8.0 = 320$ MeV

وهذه طاقة داخلة في الاندماج ، أما طاقة الربط الناتجة عن الاندماج فتساوي $40 \times 8.6 = 344$ MeV في نواة $^{40}_{20}Ca$.

فالفرق بين المتفاعلات والنواتج يساوي $344 - 320 = 24$ MeV ، وهذا الفرق يظهر على هيئة طاقة منطلقة .

كما يظهر الشكل (2–4) أن هناك انطلاقاً في طاقة الربط عند انشطار نواة عنصر لها ($A > 60$) عدد كتلي أعلى من 60 إلى نواتين خفيفتين ولكن لهما $E_{B/A}$ أعلى من النواة المنشطرة . ومثال على ذلك انشطار $^{236}_{92}U$. حيث ينشطر حسب المعادلة التالية : $^{236}_{92}U \rightarrow {}^{140}_{54}Xe + {}^{93}_{38}Sr + 3n$

فقيمة $E_{B/A}$ لـ $^{236}_{92}U$ تساوي 7.6 MeV ولـ ^{140}Xe 8.4 MeV ولـ ^{93}Sr 8.7 MeV . أما كمية الطاقة المنطلقة من الانشطار فتساوي $140 \times 8.4 + 93 \times 8.7 - 236 \times 7.6 = 191.5$ MeV لكل ذرة $^{236}_{92}U$ منشطرة .

2-9 نصف قطر النواة Nuclear radius

أوضح العالم رذرفورد أن النواة تحتل جزءاً صغيراً من الحجم الكلي للذرة ويقدر نصف قطر النواة بحوالي $\frac{1}{10000}$ إلى $\frac{1}{100000}$ من نصف قطر الذرة . ويستخدم الأنجستروم A° ($1A^\circ = 10^{-10}$ م) أو البيكوميتر Pm ($1Pm = 10^{-12}$ م) في قياس نصف قطر الذرة بينما تستخدم وحدة الفيرمي fm ($1fm = 10^{-15}$ م) في قياس نصف قطر النواة .

وجد العلماء بالتجربة أن حجم النواة V_n يتناسب طردياً مع العدد الكلي لنيوكليونز أي مع العدد الكتلي A .

$$V_n \propto A \qquad (2-7)$$

وبما أن حجم الكرة يتناسب طردياً مع مكعب نصف قطر الكرة r ،

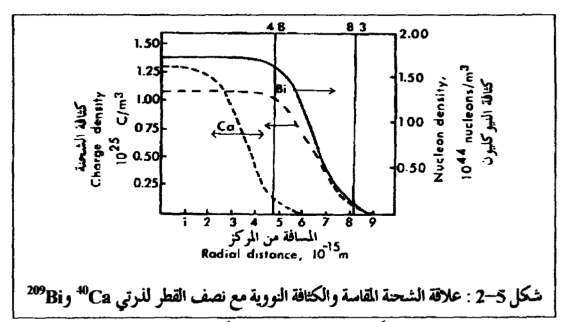
$$V \propto r^3 \qquad (2-8)$$

يمكننا الربط بين A و r حيث أن $r^3 \propto A$ أو $r \propto A^{1/3}$.

وباستخدام r_0 كمعامل تناسب فإن :

$$r = r_0 A^{1/3} \qquad (2-9)$$

والمفهوم العلمي لهذه العلاقة هو أن النواة مكونة من نيوكليونز مرصوصة على بعضها البعض مما يعني أن الكثافة ثابتة في جميع أنحاء النواة (حوالي 0.2 نيوكليونز / fm^3) من مركزها إلى حدودها . أثبتت التجارب في ما بعد أن نموذج الكثافة الثابتة غير صحيح وذلك من خلال قذف النوى بإلكترونات ذات طاقة عالية جداً أو ببروتونات ذات طاقة عالية جداً قد تصل إلى 1GeV (غيغا إلكترون فولت) ، ومن قياس زاوية التشتت والطاقة للدقائق يمكننا حساب ودراسة التغير في كثافة الكتلة وكثافة الشحنة عند سطح النواة المقذوفة . وقد أثبتت هذه التجارب أن ليس هناك توزيع منتظم للكتلة وللشحنة عند أطراف أو حدود النواة مما يعني أن سطح النواة غير واضح أو غير محدد . كما لوحظ أن هناك تناقص في كثافة الشحنة كلما ابتعدنا عن مركز النواة ويبين شكل (2-5) هذا السلوك لنواتي $^{40}_{20}Ca$ و $^{209}_{83}Bi$ ونستنتج من الشكل (2-5) أن هناك ثباتاً في كثافة الشحنة والكتلة لمسافة قصيرة من مركز النواة ومن ثم يبدأ التناقص في الكثافتين لمسافة 2.5fm تقريباً ولا يعتمد هذا السمك على العدد الذري .



شكل 5–2 : علاقة الشحنة المقاسة والكثافة النووية مع نصف القطر لنوتي ^{40}Ca و^{209}Bi

ففي نواة ^{209}Bi مثلاً تبقى الكثافة ثابتة تقريباً لحوالي 5 fm من مركز النواة ثم تبدأ بالتناقص التدريجي إلى 0.1 القيمة في 2 fm القادمة . ولقد وجد العلماء أن شكل بعض الأنوية غير كروي فبعضها له شكل مفلطح Oblate والبعض الآخر متطاول Prolate حول محور الدوران .

على ضوء ما جاء فإن فرضية الكثافة الثابتة والحدود الثابتة المحددة صالحة لمعظم الغايات والاستخدامات .

فإذا استخدمنا المعادلة (9–2) وافترضنا أن قيمة r_0 = 1.4 fm فإن نصف قطر نواة $^{40}_{20}$Ca = $1.4\ fm \times 40^{1/3} = 4.79\ fm$.

ونصف قطر نواة $^{209}_{83}$Bi = $1.4\ fm \times 209^{1/3} = 8.31\ fm$.

وهاتان القيمتان موضحتان في الشكل السابق (5–2) .

وبنفس الطريقة يمكننا أن نحسب نصف قطر $^{80}_{35}$Br الذي يساوي 6.0 fm ونصف قطر $^{238}_{92}$U الذي يساوي 8.7 fm . وإذا أمعنا النظر بالقيم الأربع لنصف القطر وجدنا أنه لا يتغير كثيراً من بداية الجدول الدوري إلى نهايته أي من العناصر الخفيفة إلى الثقيلة .

2-10 معادلة طاقة الربط الشبه تجريبية

Semiempirical Binding Energy Equation

تعلمنا في ما سبق أن حجم وطاقة ربط النواة يتناسبان طردياً مع عدد النيوكليونز في النواة . ومن علاقة الحجم نستنتج أن المادة النووية المكونة للنواة غير قابلة للانضغاط . كما نستنتج من علاقة طاقة الربط أن قوى الربط النووية تتمتع بخاصية الإشباع ، أي أن النيوكليون يرتبط فقط مع عدد صغير من النيوكليونات الأخرى وهذا يشبه ارتباط جزيء الماء في السائل مع أربع جزيئات ماء أخرى . وهناك تشابه في الخواص بين النواة وقطرة السائل وهذا التشابه دفع العلماء إلى تفسير طاقة الربط النووية على أساس نموذج جديد تكون فيه النواة وكأنها قطرة سائل مشحونة ولها توتر سطحي . وعلى هذا فإنه يمكن كتابة معادلة لطاقة ربط الكتلة الكلية في القطرة مكونة من عدة حدود (أو مقادير) منها طاقة الحجم وطاقة السطح وطاقة التنافر وغيرها ، وتعتمد هذه العوامل على العدد الكتلي A والعدد الذري Z للنواة .

ففي عام 1935 وضع العالم س.ف. فون ويزكر أول معادلة شبه تجريبية تشتمل على عدة مقادير ومعاملاتها (10−2) .

$$E_B(\text{MeV}) = a_v A - a_a \frac{(N-Z)}{A} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_s A^{2/3} \pm a_\delta A^{-1} \qquad (2-10)$$

حيث أن a_v , a_a , a_c , a_s , a_δ ثوابت .

بعد ذلك مرت هذه المعادلة بعدة مراجعات وتحسينات من قبل العلماء وذلك من خلال إضافة مقادير جديدة أو تغيير معاملاتها وأحدث معادلة هي معادلة مايرز وسويتكي (11−2) .

$$E_B(MeV)=C_1A\left[1-K\left(\frac{N-Z}{A}\right)^2\right]-C_2A^{2/3}\left[1-K\left(\frac{N-Z}{A}\right)^2\right]$$
$$-C_3Z^2A^{-1/3}+C_4Z^2A^{-1}+\delta \qquad (2-11)$$

حيث أن قيمة $C_1 = 15.667$ MeV و $C_2 = 18.56$ MeV

و $C_3 = 0.717$ MeV و $C_4 = 1.211$ MeV و $K = 1.79$.

تحتوي المعادلة (2–11) على ستة مقادير ، كما أن القيم المحسوبة بها لطاقة الربط لحوالي 1200 نواة تتفق مع القيم المقاسة ضمن 10 MeV وسندرس المقادير المختلفة بالتفصيل .

2-10-1 طاقة الحجم Volume Energy

ينظر لهذا المقدار على أنه الأهم والمسيطر وطاقة الحجم تتناسب طردياً مع العدد الكتلي وهذا يعكس خاصية الإشباع وقصر المدى للقوى النووية ، ويصل الإشباع إلى أعلى قيمة له عندما يكون عدد النيوكليونز أربعة (بروتونين ونيوترونين) فتتجاذب مع بعضها البعض ويستدل على هذا من قيم طاقة الربط العالية لـ ${}^4_2He$ و ${}^{12}_6C$ و ${}^{16}_8O$ ... إلخ ، شكل (2–4) .

أما حد التصحيح فيتناسب مع $(N-Z)^2/A$ طردياً ويسمى بطاقة التماثل Symmetry energy . ويعكس هذا الحد الحقيقة القائلة بأن القوى النووية (بغض النظر عن قوى التنافر) تكون أعلى ما يمكن عندما يكون عدد البروتونات يساوي عدد النيوترونات وتقل كلما زاد الفرق بينهما وهذا يظهر في $(N-Z)^2$.

أما الاعتماد على A^{-1} فيأتي من احتمالية وجود زوج (بروتون مع نيوترون) ضمن حجم معين وهذه الاحتمالية تتناسب عكسياً مع حجم النواة ، علماً بأن طاقة

الربط الناتجة عن هذا الزوج تتناسب مع احتمالية وجوده .

إن الاستقرار الزائد في النوى التي يتساوى فيها N و Z (N=Z) يأتي جزئياً من خلال مبدأ باولي للاستثناء والذي يقول بعدم إمكانية وجود نيوكليونين متماثلين في نفس المستوى من الطاقة .

2-10-2 طاقة السطح Surface Energy

إن النيوكليونز الموجوده في وسط النوى تتمتع بخاصية الإشباع فهي محاطة بعدد ثابت من النيوكليونز أما النيوكليونز الموجودة على السطح فهي غير مشبعة وهذا ينقص من طاقة الربط ويتناسب هذا النقص مع سطح النواة . وبما أن $r \propto A^{1/3}$ وأن مساحة سطح النواة تتناسب مع r^2 ، فإن مساحة السطح تتناسب مع $A^{2/3}$. ويلاحظ أنه كلما ازداد حجم النواة كلما نقصت نسبة مساحة السطح إلى الحجم ، مما ينقص من أهمية هذا المقدار . لا يظهر حد التصحيح لطاقة السطح في معظم معادلات طاقة الربط المعروفة سابقاً إلا أن مايرز وسويتكي أدخلا هذا الحد ، وفسرا ذلك على أساس أن في النوى ذات القيمة $|N-Z|$ العالية تقترب طاقة الحجم من الصفر وهذا سيؤدي إلى اختفاء التوتر السطحي أو طاقة السطح .

2-10-3 طاقة التنافر الكولومبي Coulomb Energy

يمثل المقدار $C_3Z^2A^{-1/3}$ طاقة التنافر الإلكتروستاتيكي الناجمة عن التنافر الكولومبي بين البروتونات ، وطاقة التنافر تنقص طاقة الربط . إذا افترضنا وجود كرة منتظمة الشحنة ذات نصف قطر R وشحنة q ، فإن الطاقة الإلكتروستاتيكية تساوي $3/5\ q^2/R$ وبما أن $q = Ze$ و $R = r_0A^{1/3}$ فإن الطاقة الإلكتروستاتيكية

تساوي $\frac{3}{5}\frac{Z^2 e^2}{r_0 A^{1/3}}$ أو $\left(\frac{3e^2}{5r_0}\right) Z^2 A^{-1/3}$ وبالتعويض بقيمة $r_0 = 1.205\ \text{fm}$
فإن $\frac{3e^2}{5r_0} = C_3 = 0.717$ MeV .

تزداد طاقة التنافر الكولومبي كلما ازداد عدد البروتونات Z وهذا يفسر ازدياد عدد النيوترونات عن عدد البروتونات في النوى المستقرة التي لها $Z > 20$ (شكل 2–2) .

عندما درسنا موضوع نصف قطر النواة تبين لنا أن توزيع الشحنة في النواة غير منتظم ومبعثر عند الحدود . وأدت هذه البعثرة إلى وجود حد تصحيح يقلل من تأثير طاقة التنافر الكولومبي وهذا الحد هو المقدار الرابع في المعادلة (2–11) .

2-10-4 طاقة الازدواج Pairing Energy

يعتمد المقدار الأخير في المعادلة (2–11) على الحقيقة القائلة بأن هناك علاقة بين طاقة الربط والطبيعة الزوجية أو الفردية لعدد البروتونات وعدد النيوترونات . وقد درسنا هذه العلاقة في السابق (2–5) . فالنوى ذات الأعداد زوجي – زوجي (e-e) أكثرها استقراراً ولهذا فإن قيمة $\delta = +11/A^{1/2}$ وأما في حالة زوجي – فردي (eZ-oN) أو فردي – زوجي (oZ-eN) فإن قيمة δ = صفراً . وأخيراً في النوى ذات الأعداد فردي – فردي (o-o) فإن قيمة $\delta = -11/A^{1/2}$. ويسمى المقدار δ في معادلة طاقة الربط بمقدار الازدواج .

إن الاستقرار الزائد والناجم عن وجود مستويات طاقة معبئة تماماً يتجلى بوضوح في عدد النوى المستقرة الكبير في فئة زوجي – زوجي وفي نسبة وجودها العالية في الطبيعة . فنجد في الغالب أن نسبة وجود العناصر ذات العدد الزوجي

من البروتونــات أعلـى مـن تلـك ذات العـدد الفـردي بحـوالي عشـر مـرات . ففـي العناصر ذات العدد الزوجي من البروتونات تشكل النظائر ذات العدد الزوجي من النيوترونات حوالي 100–70٪ من ذلك العنصر ما عدا في حالة البريليوم والزينـون والدسبروزيوم .

وفسر العلماء ما جـاء في الشـكل (2–4) الـذي تصـل فيـه E_B/A إلى أعلـى قيمة لها عند $A = 60$ على أنها نتيجة لاتجاهين متعاكسين أولهما طاقة السـطح الـتي تقل مع الزيادة في العدد الكتلي وثانيهما طاقتي التنافر الكولومـبي والتمـاثل اللتـان تزدادا مع الزيادة في العدد الكتلي .

2-11 طاقة السطح النووية والقطع المكافئ الكتلي

Nuclear Energy Surface and Mass Parabola

يمكن التعبير عن طاقة الربط لكل الأنوية على أنها دالة لـ A ولـ Z من خلال رسم ثلاثي الأبعاد للمعادلـة (2–11) . وبمقدورنـا الحصـول علـى بعـض الصفـات المفيدة لهذا الرسم قبل أن نرسمه ، ولهذا علينا التعامل مع كتلة الذرة الكلية M بدل من طاقة الربط E_B ، وتكتب معادلة طاقـة الربـط النـووي بدلالـة M علـى النحـو التالي :

$$M = Z M_H + (A\text{-}Z) M_N - E_B \qquad (2\text{–}12)$$

حيـث أن M_H كتلـة ذرة الهيدروجـين (938.791 MeV) و M_N كتلـة النيوترون (939.573 MeV) . وبالجمع بين المعـادلتين (2–11) و (2–12) نحصـل على معادلة الكتلة الشبه تجريبية (2–13) .

$$M = 939.573\,A - 0.782\,Z - (C_1A - C_2A^{2/3})\left[1 - K\left(1 - 2\frac{Z}{A}\right)^2\right]$$

$$+ Z^2(C_3A^{-1/3} - C_4A^{-1}) - \delta \qquad (2-13)$$

وبالنظر إلى المعادلة (2-13) نرى أنها معادلة تربيعية لـ Z ، وأنه يمكن كتابتها بالشكل الآتي :

$$M = f_1(A)\,Z^2 + f_2(A)\,Z + f_3(A) - \delta \qquad (2-14)$$

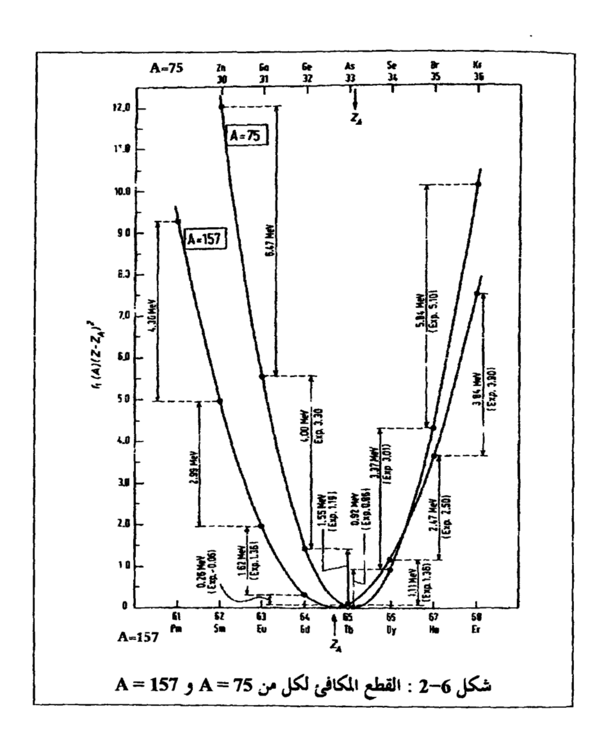
علماً بأن المعاملات الثلاث دالة لـ A ومعادلاتها كالآتي :

$$f_1(A) = 0.717\,A^{-1/3} + 111.036\,A^{-1} - 132.89\,A^{-4/3}$$

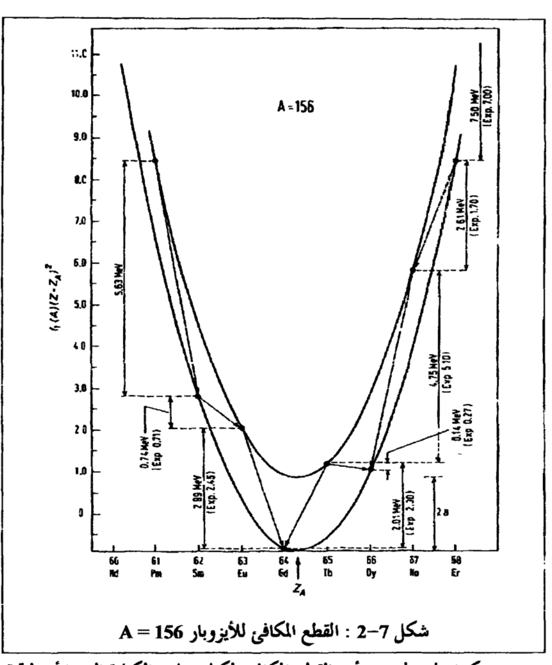
$$f_2(A) = 132.89\,A^{-1/3} - 113.029$$

$$f_3(A) = 951.958\,A - 14.66\,A^{2/3}$$

وأن قيمها ثابتة لكل قيمة من A ، مما يعني أن المعادلة (2-14) هي معادلة قطع مكافئ إذا كانت A فردية (δ = صفر) وتعطي قطعين مكافئين إذا كانت A زوجية ($\delta = \pm 11A^{-1/2}$) . ونستفيد من هذه القطوع في دراسة التحلل بدقائق بيتا، حيث يمكننا معرفة طاقة التحلل بدقائق بيتا بين الأيزوبارز المجاورة مباشرة منها . ولتوضيح هذا ، سندرس القطع المكافئ لكل من A = 157 و A = 75 (شكل 6-2) والقطعين المكافئين لـ A = 156 (شكل 7-2) .



شكل 6–2 : القطع المكافئ لكل من A = 75 و A = 157



شكل 7–2 : القطع المكافئ للأيزوبار A = 156

ويمكننا الحصول من رأس القطع المكافئ الكتلي على الكتلة الدنيا أو طاقة الربط العليا لكل قيمة من A . ومن أجل أن نجد Z_A الخاصة بالكتلة الدنيا علينا أن نفاضل المعادلة (14–2) بالنسبة لـ Z علماً بأن A ثابتة ومن ثم نساوي المشتقة $\frac{\partial M}{\partial Z}$ بالصفر فنحصل على معادلة Z_A التالية (15–2) .

$$ZA = \frac{-f_2(A)}{2f_1(A)} \qquad (2-15)$$

وبما أن Z دالة مستمرة فإن قيم Z_A عددية غير صحيحة .

فقيمة $Z_A = 64.69$ لـ $157 = A$ و $Z_A = 64.32$ لـ $156 = A$ و $Z_A = 33.13$ لـ $A = 75$.

ومن أجل أن نرسم القطع المكافئ الطاقي نستخدم المعادلة (2-15) في إعادة كتابة المعادلة (2-14) لنحصل على المعادلة الجديدة (2-16) التالية :

$$M = f_1(A)\,(Z-Z_A)^2 - \delta + f(A) \qquad (2-16)$$

حيث أن $f(A) = f_3(A) - f_2(A)^2 / 4 f_1(A)$

وبما أن $f(A)$ دالة لـ A فلا نحتاج لإيجاد قيمتها وذلك لأن الفرق في الطاقة هو ما نبحث عنه بين الأيزوبارز . وبالنظر إلى الشكلين (2-6) و (2-7) نجد أن محور (ص) يمثل $f_1(A)\,(Z-Z_A)^2$. تكون الكتلة ذات $Z = Z_A$ في الأيزوبارز ذات A الفردية موازية للصفر على محور ص وذلك لأن $Z-Z_A$ تساوي صفر وأما عندما تكون A زوجية فيقع الصفر في منتصف المسافة بين رأسي القطعين المكافئين زوجي-زوجي وفردي-فردي . وتحدد $f_1(A)$ عرض القطع المكافئ حيث تقل قيمتها كلما زادت A وهذا يعرض وادي الاستقرار في سطح الطاقة النووي كلما ازدادت A (شكل 2-6) .

وإذا قمنا بدراسة القطوع المكافئة لمجموعة من الأيزوبارز وجدنا عدة استنتاجات مهمة تتعلق بالاستقرار النووي . فعلى سبيل المثال هناك فقط نواة واحدة مستقرة نحو بيتا (β) في الأيزوبارز ذات A الفردية تكون قريبة جداً لأدنى قيمة في القطع المكافئ ، ويكون هناك نواتان مستقرتان أو ثلاث أنوية (نوى) مستقرة في الأيزوبارز ذات A الزوجية وجميعها من النوع زوجي-زوجي . ويمكننا

القول أن هناك نواتان مستقرتان ^{156}Gd و ^{156}Dy في الشكل (7−2) وذلك لأن لكل منهما كتلة أقل من جارهم ^{156}Tb . ومن وجهة الديناميكا الحرارية فإن ^{156}Dy غير مستقر نحو التحلل إلى ^{156}Gd الذي ينقصه في الكتلة ، ومن أجل أن يحدث هذا عليه أن يطلق دقيقتي β في نفس الوقت (في هذه الحالة اقتناص الإلكترون) وتسمى هذه العملية بتحلل β المزدوج double β-decay . ومن المتوقع أن يكون لهذه العملية نصف عُمر عال جداً ناتج عن الاحتمالية القليلة جداً لحدوثها . ومن الأمثلة المعروفة $^{130}_{52}Te$ إلى $^{130}_{54}Xe$ بنصف عُمر سنة $t_{1/2} = 2\times10^{21}$ و $^{82}_{34}Se$ إلى $^{82}_{36}Kr$ بنصف عُمر سنة $t_{1/2} = 1\times10^{20}$.

ويوضح الشكلان (6−2) و(7−2) التناوب بين القيم الصغيرة والكبيرة لطاقة التحلل بيتا في الأيزوبارز ذات A الزوجية بينما تزداد الطاقة لبيتا في اتجاه Z_A من كلا الطرفين في الأيزوبارز ذات A الفردية . ونرى في الشكل (7−2) إمكانية النواة الفردي–الفردي مثل $^{156}_{65}Tb$ على التحلل إلى جارتيها الزوجي–الزوجي بواسطة التحلل بـ β^- أو β^+ واقتناص الإلكترون E.C ، ولحد الآن لم يتم الكشف مخبرياً على تحلل ^{156}Tb بـ β^- وذلك لأن طاقة التحلل قليلة جداً ، وتسمى هذه الظاهرة بالتحلل المتفرع Branching Decay .

ونلاحظ أيضاً في الشكلين (6−2) و (7−2) وجود قيم مقاسة لطاقة التحلل بيتا ، وإذا قورنت هذه القيم مع تلك المحسوبة من معادلة طاقة الربط تبين لنا أن هناك توافقاً كبيراً يقع ضمن عدة مئات من KeV . وللحصول على توافق تام فلابد من إدخال تعديل على $f_1(A)$ و Z_A لتطابق مع نقاط معروفة في منطقة A و Z . ومن الأمثلة على ذلك أن ^{157}Tb هو الأيزوبار المستقر ضمن $A = 157$ ولهذا نتوقع أن ^{157}Gd سيتحلل بواسطة β لـ ^{157}Tb بطاقة تساوي 0.26MeV . ومن

الغريب أن ^{157}Gd نظير مستقر وأن ^{157}Tb يتحلل بواسطة E.C ليعطي ^{157}Gd وبطاقة مقاسة تساوي 0.06MeV . ومن أجل أن نحصل على توافق مع هذه الحقيقة العملية علينا أن ننقص 0.2 من قيمة Z_A ، وهذا التعديل سيفيدنا في الحصول على قيم لطاقة β مساوية للقيم المقاسة وفي التقدير الصحيح للقيم التي لم يتم قياسها بعد مثل ^{157}Sm و ^{157}Pm .

الأسئلة :

1) احسب طاقة الربط لكل نيوكليون للنظائر التالية :
^{6}Li , ^{31}P , ^{40}Ca , ^{60}Ni , ^{108}Pd , ^{137}Cs , ^{195}Pt , ^{238}U وذلك من معادلة طاقة الربط ومن الكتل الذرية في ملحق أ .

2) احسب من الكتل الذرية في ملحق أ ما يلي :
أ) طاقة الربط للنيوترون المضاف إلى كل من ^{16}O , ^{50}V , ^{239}Pu .
ب) طاقة الربط للبروتون المضاف إلى كل من ^{10}B , ^{52}Mn , ^{234}Th
(الجواب أ) ^{239}Pu 6.53 MeV ، ب) ^{52}Mn 7.53 MeV) .

3) استخدم معادلة طاقة الربط النووي بدلالة M لإيجاد ما يلي :
أ) الطاقة المنطلقة من إضافة نيوترون إلى نواة ^{235}U .
ب) الطاقة المنطلقة من إضافة نيوترون إلى نواة ^{238}U .
جـ) الطاقة المنطلقة لبيتا من تحلل ^{129}I إلى ^{129}Xe .
قارن أجوبتك بالقيم المحسوبة من قيم الزيادة في الكتلة من ملحق أ .
(الجواب أ) 6.7 MeV) .

4) عين قيم Z_A لكل من A = 27 , A = 131 , A = 204 وذلك باستخدام معادلة الكتلة الشبه تجريبية ، ثم قارنها مع النتائج العملية في ملحق أ .
(الجواب Z_{27} = 12.68) .

5) احسب الطاقة الناتجة من :
أ) تحلل كل من ^{192}Pt , ^{238}U , ^{252}Cf بواسطة α .
ب) انشطار كل من ^{240}Pu , ^{236}U , ^{252}Cf إلى جزئين متساويين .
(الجواب ^{252}Cf أ) 6.22 MeV ب) 232 MeV) .

الفصل الثالث

طرق التحلل الإشعاعي النووي

RADIOACTIVE DECAY PROCESSES

3-1 مقدمة

ينظر للتحلل الإشعاعي النووي على أنه تغير نووي تلقـائي لا يتـأثر بـالضغط ولا بدرجة الحرارة ولا بالصيغة الكيميائية ... إلخ .

ولهذا فقد تمكنا من تشخيص النوى المشعة على أساس فترة التحلل وطريقة التحلل وطاقة التحلل بغض النظر للحالة الكيميائية والفيزيائية . ويعبر عن فترة التحلل من خـلال فترة نصف العُمر $t_{1/2}$ وهي المدة الزمنية اللازمة لتحلل نصف عدد ذرات النظـير المشـع ، ومهما كان عدد الذرات الموجودة منـه في البـدء (شكل 1-1) . تـتراوح فـترات نصـف العُمر من ملايين السنين إلى أجزاء من الثانية . ومن السهل قياس فترات نصف العمر الـتي تتراوح ما بين دقيقة إلى سنة بالطرق المخبرية البسيطة ، وأما الفترات القصـيرة جـداً فإنهـا تحتاج إلى طرق مفصلة ومعقدة وباستخدام الأجهزة المتقدمة . وقد تمكن العلماء من قيـاس فترة نصف عمر في حدود 10^{-14} ثانية والتحلل الإشعاعي الذي يحـدث في أقـل مـن هـذه المدة الزمنية هو تحلل فوري . وفي المقابل فإذا كانت فترة نصف العمر أكثر من 10^{15} سـنة فإنه لا يمكن ملاحظة هذا التحلل فوق الإشعاع الخلفي الطبيعي ولهذا اعتبرت هذه النـوى مستقرة نحو التحلل بالإشعاع . وفترة 10^{15} سنة أكبر من عمر الكون بـ 10^5 مرة .

يتضمن التحلل بالإشعاع الانتقال من حالـة كميـة محـددة في النـواة الأصليـة المتحللة إلى حالة كمية محددة في النواة الناتجـة والفـرق في الطاقـة مـا بـين المسـتويين الكميين المذكورين في التحلل يساوي طاقة التحلل . وتظهر طاقة التحلل على هيئـة إشعاعات كهرومغناطيسية أو كطاقة حركية للنواتج .

وتعتمد طريقة التحلل بالإشعاع على تلك النواة المتحللة .

ويقسم التحلل الإشعاعي إلى ثلاثة أنواع :

أ) التحلل بدقائق ألفا α .

ب) التحلل بدقائق بيتا β .

جـ) التحلل بإشعاعات جاما γ .

ويرتبط التحلل بألفا بانطلاق أنوية الهيليوم والتحلل بيتا بتكون وانطلاق الإلكترونات السالبة (نيغاترون) أو الإلكترونات الموجبة (بوزترون) ، وبحدوث عملية اقتناص للإلكترون E.C . أما التحلل بجاما فهو انطلاق للأشعة الكهرومغناطيسية الناجمة عن انتقال النواة من مستوى طاقة إلى مستوى طاقة آخر أقل طاقة وهناك طريقة أخرى للتحلل الإشعاعي وتسمى بالتحول الداخلي Internal Conversion (I.C) ، حيث يتفاعل المجال النووي مع الإلكترونات في الأفلاك فتخسر النواة طاقتها ويصاحب هذا تأين إلكترون عوضاً عن انطلاق أشعة جاما . ولاحظ العلماء أن هناك طريقة أخرى تحدث في النوى الثقيلة ($Z>91$) وتسمى بالانشطار التلقائي Spontaneous fission (S.F) حيث تنقسم النواة إلى قسمين متساويين تقريباً . ويصاحب الانشطار انطلاق إشعاعات كهرومغناطيسية ونيوترونات . كما لوحظ في العشرين سنة الماضية بعض طرق التحلل الإشعاعي الغريبة في النوى التي تقع بعيدة عن خط الاستقرار كانطلاق بروتون أو نيوترون .

واقترح العلماء استخدام طريقة مختصرة للتعبير عن التحللات الإشعاعية ، كما هو موضح في سلسلة ^{238}U الإشعاعية (شكل 2–1)

$^{238}U(\alpha)\ ^{234}Th(\beta^-)\ ^{234}Pa(\beta^-)\ ^{234}U(\alpha)$, ... إلخ

كما يمكننا أن نذكر معها أنصاف العمر $t_{1/2}$ كالآتي :

^{238}U (α , 4.5×10^{9} سنة) ^{234}Th (β^{-} , 24 يوم) ^{234}Pa (β^{-} , 1.1 دقيقة)

^{234}U (α , 2.5×10^{5} سنة) , ... إلخ

وسوف ندرس طرق التحلل الإشعاعي من خلال طاقة الربط النووي وميكانيكية وحركية التحلل .

3-2 قوانين الحفظ Conservation Laws

يجب استيفاء عدد من قوانين الحفظ في التحلل الإشعاعي والتفاعلات النووية، وتضع هذه القوانين الحدود لهذه العمليات ، فلو أخذنا التفاعل التالي :

$$X_1 + X_2 \rightarrow X_3 + X_4 \qquad (3-1)$$

حيث تمثل X دقيقة نووية أو أساسية .

ففي التفاعلات النووية تكون X_1 الدقيقة المقذوفة (مثل ذرة ^{4}He في حزمة من دقائق ألفا α) و X_2 ذرة الهدف (مثل ذرات ^{14}N)وأما X_3 و X_4 فهي النواتج (مثل ^{1}H و ^{17}O) .

وفي بعض الأحيان يتكون ناتج واحد وفي أحيان أخرى يتكون أكثر من ناتجين وتتكون في التحلل الإشعاعي عدة نواتج ولهذا تكتب المعادلة (1−3) كالآتي:

$$X_1 \rightarrow X_2 + X_3$$

وسوف ندرس قوانين الحفظ المبنية على المعادلة (1−3) .

أ) الطاقة الكلية Total Energy .

الطاقة الكلية للنظام ثابتة

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4 \qquad (3-2)$$

وتمثل E كل أشكال الطاقة مثل الطاقة الكتلية ، الطاقة الحركية ، الطاقة

الإلكتروستاتيكية ... إلخ .

ب) الزخم الخطي **Linear Momentum** .

$$P = mV \quad \text{(m : الكتلة ، V : السرعة)} \tag{3-3}$$

يجب المحافظة على الزخم الخطي في النظام وذلك بأن يكون :

$$P_1 + P_2 = P_3 + P_4 \tag{3-4}$$

وتعطى الطاقة الحركية E_{kin} بدلالة الزخم الخطي كما يلي :

$$E_{kin} = P^2/2m \tag{3-5}$$

جـ) الشحنة الكلية **Total Charge** .

الشحنة الكلية للنظام ثابتة ، أي أن :

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4 \tag{3-6}$$

وتستخدم وحدة الشحنة في التعبير عن الشحنة .

د) العدد الكتلي **Mass Number** .

العدد الكتلي للنظام ثابت ، وهذا يعني أن :

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4 \tag{3-7}$$

هـ) الزخم الزاوي النووي الكلي P_I .

Total Nuclear Angular Momentum P_I

يجب المحافظة على الزخم الزاوي النووي الكلي للنظام وعلى هذا الأساس فإن :

$$(P_I)_1 + (P_I)_2 = (P_I)_3 + (P_I)_4 \tag{3-8}$$

وبما أن هناك نوعان من الزخم الخطي ، أولهما ينتج عن حركة النيوكليون في المدار وثانيهما ينتج عن الغزل الذاتي للنيوكليونات ويسمى بالزخم الزاوي الداخلي ، كتب العلماء المعادلة (3-8) بدلالة رقم الكم المغزلي النووي I على النحو التالي :

$$\Delta I = I_3 + I_4 - I_1 - I_2 \quad (3-9)$$

والقاعدة الكمية تقول بوجوب أخذ ΔI للقيم التالية :

$$\Delta I = 1 , 2 , 3 , \ldots \quad (3-10)$$

وهذا يعني أن للتغير في الغزل النووي لتفاعل ما قيمة عددية صحيحة .

فالقوانين الثلاثة الأولى (أ و ب و جـ) موجـودة أيضـاً في الفيزيـاء التقليديـة وأما القانونان (د و هـ) فهي خاصة بالتفاعلات النووي .

3-3 التحلل بألفا Alpha Decay (α)

ينجم عن دقائق ألفا كمية كبيرة من التأين في المادة ، ولـو سمـح لدقـائق ألفا بالمرور عبر غاز ما فإن الإلكترونات الناتجة عن التأين ستتجمع على القطب الموجب وهذا سيؤدي إلى مرور تيار كهربائي . وبنيت عدة أجهزة لقياس ألفـا علـى أسـاس تأين الغاز كما في حجرات التأين وعدادات التناسب وقد يؤدي تفاعل دقـائق ألفا مع المادة إلى حدوث تهيج للجزيئات وقـد ينتـج عـن ذلـك الفلورسـنس ، وسـاعد الفلورسـنس أو الوميـض في دراسـة الدقـائق النوويـة . ومـن الأجهـزة الحديثـة المستخدمة للوميـض عـدادات الوميـض **Scintillation Counter** . ومـن المـواد الحساسة المستخدمة لهذا الغرض كبريتيد الخـارصين (الزنـك) الفوسـفوري وتكسـو هذه المادة سطحاً زجاجياً في الجهاز ، كمـا أنهـا تطلـق فوتونـات في منطقـة الضـوء المرئي نتيجة لتفاعل دقـائق ألفـا معهـا . ويتـم الكشـف عـن الفوتونـات باسـتخدام أجهزة قياس شدة الضوء .

3-3-1 طاقة التحلل Decay Energy

لوحظ التحلل بدقائق ألفا في العناصر الثقيلة والتي لهـا عـدد ذري أكبر مـن العـدد

الذري للرصاص (Z = 82) ، وفي بعض اللانثيدات . ويرمز لهذا التحلل بالمعادلة التالية :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He \qquad (3-11)$$

والسلاسل النووية خير مثال على هذا التحلل (شكل 2-1) .

وتحسب طاقة التحلل من الكتل الذرية المعروفة ، وذلك لأن مصدر طاقة الربط المنطلقة (التحللات التلقائية النووية مطلقة للطاقة دائماً) هو النقص في الكتلة، ارجع إلى المعادلتين (3-2) و (6-2) .

وتسمى طاقة التحلل بقيمة Q للتفاعل .

$$Q(MeV) = 931.5\ \Delta M_A \qquad (3-12)$$

وتعرف قيمة Q لتحلل ألفا (α) كما يلي :

$$Q_\alpha = 931.5\ (M_Z - M_{Z-2} - M_{He}) \qquad (3-14)$$

ويعني النقص في الكتلة انطلاق للطاقة ، ولهذا نطرح النواتج من المتفاعلات فنحصل على قيمة موجبة لـ Q_α للتحلل التلقائي . ومن الأمثلة المفيدة :

$$^{238}U \rightarrow {}^{234}Th + \alpha$$

فإذا كانت كتلة ^{238}U = 238.050770 و.ك.ذ ، و $^{4}_{2}He$ = 4.002604 و.ك.ذ ، و ^{234}Th = 234.043583 و.ك.ذ ، فإن Q_α تساوي

$$Q_\alpha = 931.5\ (238.050770 - 234.043583 - 4.002604)$$

$$Q_\alpha = 4.269\ MeV$$

فإذا تكونت النواتج في الحالة الأرضية ، وهذا ما يحدث غالباً في التحلل بألفا، توزعت طاقة التحلل الكلية Q_α إلى طاقة حركية للنواة البنت (E_{Z-2}) وطاقة حركية لنواة الهيليوم (E_α) ، أي أن Q_α تساوي :

$$Q_\alpha = E_{Z-2} + E_\alpha \qquad (3-15)$$

وبسبب قانوني حفظ الطاقة (معادلة 2-3) وحفظ الزخم (معادلة 4-3) ،

فإن :

$$E_{Z-2} = \frac{Q_\alpha M_\alpha}{M_Z} \qquad (3-16)$$

وأن

$$E_\alpha = \frac{Q_\alpha M_{Z-2}}{M_Z} \qquad (3-17)$$

وعلى هذا فإن الطاقة الحركية لـ ^{234}Th = 0.072 MeV ، ولدقيقة α = 4.197 MeV . أي أن لدقيقة ألفا طاقة حركية أكبر بكثير من الطاقة الحركية للنواة البنت وذلك بسبب الفرق الكبير في الكتلة بين النواة البنت ودقيقة ألفا . وعندما تقارن بين طاقة النواة البنت (72000 eV) وطاقة الربط الكيميائي (أقل من 5eV) يتبين لنا قدرة النواة البنت (النواة المرتدة Recoil Nucleus) على كسر جميع الروابط الكيميائية التي تربطها مع الذرات الأخرى .

وفي عام 1904 لاحظ العالم هـ. بروكس ، أثناء القياسات التي كان يجريها على $^{218}Po(RaA)$ ، تلوث حجرة الكشف بـ $^{214}Pb(RaB)$ و $^{214}Bi(RaC)$. وفسر العالم رذرفورد هذا على أساس نواة البنت المرتدة في تحلل ^{218}Po بألفا التالي:

$^{222}Rn(\alpha , 3.8d)$ $^{218}Po(\alpha , 3.05\ min)$

$^{214}Pb(\beta^- , 27\ min)$ $^{214}Bi(\beta^- , 20\ min)$ ....

ويؤدي الارتداد إلى قذف ^{214}Pb نحو حائط حجرة الكشف . وتستخدم أجهزة المطياف المغناطيسية في قياس طاقة دقائق ألفا بدقة عالية وذلك بالاعتماد على المعادلة التالية :

$$E_\alpha = \frac{2e^2B^2r^2}{m_{He}} \qquad (3-18)$$

حيث e هي شحنة الإلكترون و B هو المجال المغناطيسي و r هو نصف قطر الانحناء و m_{He} هي كتلة ألفا .

3-4 التحلل بيتا Beta Decay

تحدث الإلكترونات ذات الطاقة العالية تأين وتهيج لجزيئات المادة ولكنه

أضعف وأصعب من تأثير دقائق ألفا . ولهذا لابُد من تضخيم هذا التأثير لنتمكن من عد كل دقيقة من دقائق بيتا . ويستخدم التأين في عدادات التناسب وغايغر ، وأما التهيج فيستخدم في عدادات الوميض .

3-4-1 عملية التحلل ببيتا β-Decay Process

تشتمل عمليات التحلل ببيتا على ما يلي :

أ) انطلاق الإلكترون السالب (نيغاترون) $_{-1}^{0}e$ أو β^- .

ب) انطلاق الإلكترون الموجب (البوزترون) $_{+1}^{0}e$ أو β^+ .

جـ) اقتناص الإلكترون (E.C) .

ومن الأمثلة على التحلل ببيتا :

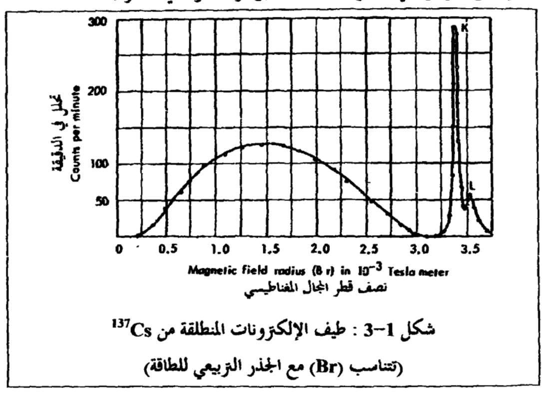
$$^{137}Cs \rightarrow {}^{137}Ba^{m} + \beta^{-} \qquad (3-19)$$

ويحدث هذا التحلل بين مستويات كمية محددة في النواة الأب ^{137}Cs والنواة البنت $^{137}Ba^{m}$.

تحدد المستويات الكمية في النواة بعدة أرقام كمية وأهمها رقم الكم المغزلي النووي Nuclear Spin ، ورقم الكم المغزلي النووي لمستوى ^{137}Cs في الحالة الأرضية هو $7/2$ ولـ $^{137}Ba^{m}$ هو $11/2$ ، وبما أن الإلكترون من الدقائق الأساسية، فله رقم كم مغزلي $\frac{1}{2}$. وكما ذكرنا سابقاً فإنه يجب المحافظة على الزخم الزاوي النووي في التفاعلات النووية (2–3) ، وهذا يعني أن يكون الفرق في الغزل الكلي بين المتفاعلات والنواتج مساوياً لقيمة عددية صحيحة في عمليات التحلل الإشعاعي (معادلة 10–3) . وإذا أمعنا النظر في المعادلة السابقة (19–3) اكتشفنا مخالفتها لقاعدة حفظ الغزل ، فمجموع الغزل لـ $^{137}Ba^{m}$ وللإلكترون يساوي $1/2 + 1\,1/2 = 6$ ، ولـ ^{137}Cs $7/2$.

والفرق في الغزل $\Delta I \; \frac{7}{2} - 6 = 5/2$ وحدة غزل ، وهـي قيمة عددية غير صحيحة ، وهذا يخالف قانون حفظ الزخم الزاوي ، فكيف يحدث هذا ؟

وقبل أن نجيب على هذا التساؤل لندرس خاصية أخرى من خصـائص بيتـا ، وهذه الخاصية تتعلق بطيـف دقـائق بيتـا ، فلـو أخذنـا طيـف ^{137}Cs (شـكل 1-3) لاحظنا أن هناك توزيعاً مستمراً للطاقة وهـذا يخالف مـا قلنـاه مـن أن التحلـل هـو عبارة عن تغير نواة في مستوى طاقة محدد إلى نواة أخرى في مستوى طاقة محدد .



شكل 1-3 : طيف الإلكترونات المنطلقة من ^{137}Cs

(تتناسب (Br) مع الجذر التربيعي للطاقة)

3-4-2 النيوترينو The Neutrino

دفعت مشكلة حفـظ الغـزل والطيـف المسـتمر العـالم بـاولي W. Pauli إلى افتراض وجود دقيقة أخرى تنطلق مع دقيقة بيتا سميت بالنيوترينو ويرمز لهـا بـالرمز

υ . وللنيوترينو كتلة تساوي صفراً وشحنة تساوي صفراً وغزلاً يساوي $\frac{1}{2}$ ، وهي بهذا تشبه الفوتون إلا أنها لا تتفاعل مع المادة كالفوتون ، حتى يقال أنه قد يمر عبر الأرض دون أن يتفاعل .

وقد أتاح غزل النيوترينو التحقق من قانون حفظ الزخم الزاوي ، فنجد في المثال السابق أن قيمة الغزل الكلي للنواتج تساوي $1\frac{1}{2}+\frac{1}{2}+\frac{1}{2}=\frac{13}{2}$ ، وإذا طرحنا غزل ^{137}Cs $\frac{7}{2}$ عن $\frac{13}{2}$ ، حصلنا على $\Delta I = 3$ ، وهذه قيمة عددية صحيحة تتفق مع قانون حفظ الغزل . ونتيجة لما سبق فإننا نكتب تفاعل التحلل (3–19) على النحو التالي :

$$^{137}Cs \rightarrow {}^{137}Ba^{m} + \beta^{-} + \bar{\upsilon} \qquad (3\text{–}20)$$

ويشير الرمز $\bar{\upsilon}$ إلى وجود دقيقة تسمى بمضاد النيوترينو .

وتبين للعلماء أن مضاد النيوترينو ينطلق مع الإلكترون السالب (نيغاترون) والنيوترينو υ ينطلق مع الإلكترون الموجب (البوزترون) . كما فسرت نظرية النيوترينو طيف الطاقة لتحلل بيتا وذلك من خلال الكتلة النسبية والكتلة الساكنة. ففي عام 1901 أثبت العالم كوفمات أن كتلة الإلكترون m تزداد إذا اقتربت سرعته (V) من سرعة الضوء C ، وتتبع هذه الزيادة المعادلة التالية :

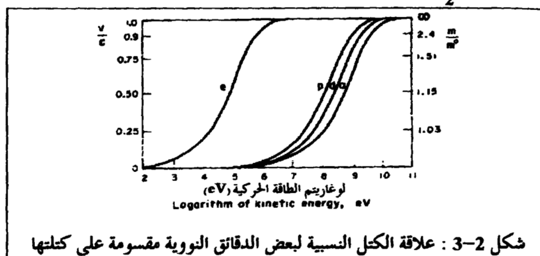
$$m = m^{0}\left(1-\frac{V^{2}}{C^{2}}\right)^{-\frac{1}{2}} \qquad (3\text{–}21)$$

المبنية على دراسات هـ. لورينتز للعلاقة ما بين المسافة وسرعة الضوء والزمن.

m^{0} هي الكتلة الساكنة للدقيقة (عندما تساوي السرعة V= صفر) ، و m هي الكتلة النسبية . وتستخدم المعادلة (3–21) في دراسة جميع الأجسام السيارة أكانت ميكروسكوبية أو ماكروسكوبية .

ويبين لنا الشكل (2-3) العلاقة ما بين $\frac{V}{C}$ والطاقة الحركية للدقيقة

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m V^2$$



شكل 2-3 : علاقة الكتل النسبية لبعض الدقائق النووية مقسومة على كتلتها الساكنة مع الطاقة الحركية للدقيقة

وإذا طبقنا نظرية ذات الحدين الجبرية على ما في داخل القوس في المعادلة (3-21) نتجت المعادلة التالية (3-22) .

$$m = m^0 + \frac{\frac{1}{2} m^0 V^2}{C^2} \qquad (3-22)$$

والمقدار الأول من اليمين عبارة عن الطاقة الحركية مقسومة على سرعة الضوء . أي أن :

$$m \approx m^0 + E_{Kin}/C^2 \qquad (3-23)$$

وأن الزيادة في الكتلة Δm تساوي $\Delta m = m - m^0$ ، وهذا يعني أن الطاقة الحركية للدقيقة تساوي

$$E_{kin} = \Delta m\, C^2 \qquad (3-24)$$

وتؤدي هذه المعادلة (3-24) من خلال نظرية أينشتاين النسبية إلى علاقة الكتلة والطاقة المعروفة التالية :

$$E = mC^2 \qquad (3-25)$$

والتي استخدمناها في دراسة طاقة الربط النووي .

يحمل النيوترينو المنطلق من النواة كمية من الطاقة على هيئة طاقة حركية وبناء على ما جاء في المعادلة (3-23) يمكننا القول أن للنيوترينو كتلة m أكبر من الصفر وزخم يساوي $mV = P$ ، وتم إثبات هذا من خلال دراسة الارتداد في تحلل بيتا .

ومن أجل أن نستخدم المعادلة التالية (معادلة طاقة بيتا E_β)

$$E_\beta = e^2 B^2 r^2 / 2m_e \qquad (3-26)$$

بشكل صحيح وجب علينا استخدام الكتلة النسبية ، ويبين لنا الشكل (2-3) أن الكتلة النسبية عند طاقة 0.1 MeV أكبر بـ 15٪ من الكتلة الساكنة m_e^0 .

تتوزع الطاقة المنطلقة في تحلل بيتا ما بين النيوترينو والإلكترون والنواة البنت المرتدة . وطاقة الأخيرة أقل بكثير من النيوترينو والإلكترون مما يسمح بإهمالها . أي أن طاقة تحلل بيتا الكلية تتوزع ما بين النيوترينو والإلكترون ، فعلى سبيل المثال إن طاقة التحلل $^{137}Cs \rightarrow {}^{137}Ba^m$ الكلية تساوي $Q_\beta = 0.514$ MeV وتسمى بـ E_{max} وهي تساوي أعلى قيمة لطاقة بيتا في طيف الطاقة المستمر . فإذا كانت طاقة الإلكترون 0.400 MeV فإن طاقة النيوترينو المكملة تساوي 0.114 MeV وإذا كانت طاقة الإلكترون 0.114 MeV فإن طاقة النيوترينو تساوي 0.400 MeV .

وقد وجد العلماء أن معدل طاقة β^- يساوي 0.3 E_{max} تقريباً ومعدل طاقة β^+ يساوي 0.4 E_{max} تقريباً .

3-4-3 التحلل بالإلكترون السالب (نيغاترون)

Negatron Decay

تمثل المعادلة التالية (3-27) عملية التحلل بالإلكترون السالب

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y^{+1} + {}^{0}_{-1}\beta + \overline{\upsilon} \qquad (3-27)$$

فللنواة البنت شحنة موجبة وذلك لأن عدد الإلكترونات الموروثة من $^{A}_{Z}X$ يساوي Z بينما عدد البروتونات يساوي Z+1 ، ولهذا فإنها تقتنص إلكترون سالب من المحيط لتصبح متعادلة (معادلة 28–3) .

$$^{A}_{Z+1}Y^{+1} + e^{-} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y \qquad (3-28)$$

وإذا أمعنا النظر في المعادلة (27–3) نجد أنها موزونة من حيث الإلكترونات وذلك من خلال إضافة الإلكترون المنطلق إلى النواة البنت الموجبة . ولهذا فإننا لا نحسب كتلة الإلكترون المنطلق في حسابنا لطاقة تحلل بيتا Q_{β} ونأخذ كتلة الذرة البنت على أنها متعادلة كما في المعادلة (29–3) .

$$Q_{\beta^-} = 931.5\left(M_Z - M_{Z+1}\right) \qquad (3-29)$$

ومن الأمثلة على ذلك تحلل النيوترون الحُر في الفراغ :

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}P + {}^{0}_{-1}e + \overline{\upsilon} \qquad (3-30)$$

أو

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}H + \overline{\upsilon}$$

وقيمة Q_{β^-} هي :

$$Q_{\beta^-} = 931.5\ (1.008665 - 1.007825) = 0.782\ \text{MeV}$$

3-4-4 التحلل بالإلكترون الموجب (بوزترون)

Positron Decay

تمثل المعادلة التالية عملية التحلل بالإلكترون الموجب (31–3) :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y^{-1} + {}^{0}_{+1}\beta + \upsilon \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{+1}e + \upsilon \qquad (3-31)$$

تحمل النواة البنت شحنة سالبة وذلك لأن عدد البروتونات أقل من عدد الإلكترونات الموروثة بواحد . وإذا أخذنا ذرة النواة البنت المتعادلة حصلنا على

إلكترون سالب في النواتج كما هو مبين في المعادلة (31–3) . ومن الأمثلة على ذلك تحلل $^{22}_{11}Na$ حسب المعادلة التالية (32–3) :

$$^{22}_{11}Na \rightarrow ^{22}_{10}Ne + ^{0}_{-1}e + ^{0}_{+1}e + \upsilon \qquad (3-32)$$

وقيمة Q_β هي :

$$Q_{\beta^+} = 931.5(M_Z - M_{Z-1} - 2Me) \qquad (3-33)$$

حيث أن $2Me = M_{^{0}_{-1}e} + M_{^{0}_{+1}e} = 2 \times 0.000549$ و.ك.ذ

$= 0.001098$ و.ك.ذ

و $MeV\ 1.022 = MeV\ 931.5 \times 0.001098$

أي أن كتلة الإلكترون بوحدة $MeV = 0.511\ MeV$.

وبتعويض قيم M من الملحق أ بدلالة Δ الزيادة في الكتلة نحصل على ما يلي:

$$Q_{\beta^+} = (\Delta_{Na} + 22) - (\Delta_{Ne} + 22) - 1.022MeV$$

$$= -5.184 + 22 - (-8.026) - 22 - 1.022\ MeV$$

$$= -5.184 + 8.026 - 1.022\ MeV = 1.820\ MeV$$

3-4-5 التحلل باقتناص الإلكترون

Electron Capture (E.C)

يكتب اقتناص الإلكترون بالطريقة التالية (34–3) .

$$^{A}_{Z}X \xrightarrow{E.C} {}^{A}_{Z-1}Y \qquad (3-34)$$

يأتي الإلكترون المقتنص من الأفلاك الداخلية للذرة . وقد ترتبط التسمية بمستوى الطاقة الرئيسي الذي يقتنص منه الإلكترون ، فإذا اقتنص من المستوى الطاقة الرئيسي K سميت باقتناص K وإذا كان المستوى الرئيسي هو L سميت باقتناص L .

أما احتمالية الاقتناص من المستوى K فهي أكثر بكثير من تلك من المستوى L ، وذلك لأن دالة الموجة لإلكترونات K أكبر بكثير عند النواة من تلك لإلكترونات L .

ويمكننا القول أن احتمالية الاقتناص تقل كلما ازدادت n للمستوى الرئيسي.

تحسب طاقة التحلل لـ E.C كما يلي :

$$Q_{EC} = 931.5\,(M_Z - M_{Z-1}) \qquad (3-35)$$

ويتحلل $^{22}_{11}Na$ إلى $^{22}_{10}Ne$ بطريقة EC أيضاً وبنسبة 9.5٪ . وبالاعتماد على ما جاء في المثال السابق فإن :

$$Q_{EC} = (\Delta_{Na} + 22) - (\Delta_{Ne} + 22)\ MeV$$

$$= (-5.184 + 22) - (-8.026 + 22)\ MeV$$

$$= -5.184 + 8.026 = 2.842\ MeV$$

وهذا يعني أن $Q_{E.C}$ أكبر من Q_{β^+} بـ 1.022 MeV ويتنافس التحلل بالبوزترون مع التحلل باقتناص الإلكترون في المنطقة ما بين Z = 30 إلى Z = 80. أما في منطقة Z أقل من 30 فيكون التحلل بالبوزترون هو المسيطر وفي منطقة Z أعلى من 80 فيكون التحلل باقتناص الإلكترون هو المسيطر .

3-4-6 النواة البنت المرتدة Recoiled Daughter

إذا انطلقت دقيقة بيتا والنيوترينو بنفس الزخم ولكن في اتجاهين متعاكسين فلن ترتد النواة البنت لأن سرعتها تساوي صفر وزخمها يساوي صفر . أما إذا انطلقا في نفس الاتجاه أو كان لأحدهما طاقة تساوي E_{max} فعندها سيصل ارتداد النواة البنت إلى أقصى كمية له .

ونعبر عن هذا بالمعادلة التالية :

$$Q_\beta = E_d + E_{max} \qquad (3-36)$$

حيث أن E_d هي طاقة ارتداد النواة البنت . وبالرجوع إلى قانوني حفظ

الطاقة والزخم وإلى التغير النسبي في كتلة الإلكترون فإن E_d ستساوي :

$$E_d = \frac{me^0 . E_{max}}{m_d} + \frac{E_{max}^2}{m_d c^2} \qquad (3-37)$$

وفي الغالب فإن قيمة E_d تساوي 100 eV ، وهذه الطاقة كافية لإعادة ترتيب الذرات في الجزيئات المحيطة بها .

ففي تحلل ^{14}C إلى ^{14}N ، E_{max} تساوي 0.155 MeV وتصل قيمة Ed إلى 7 eV . ومن التطبيقات على هذا ما يلي :

يوسم جزيء الإيثان بالكربون 14 كما يلي $^{14}CH_3\ ^{14}CH_3$ ، ثم نتركه ليتحلل فنجد أن جزيء $^{14}CH_3\ NH_2$ سيتكون في 50٪ من الحالات التي تتحلل فيها واحدة من ذرتي ^{14}C ، على الرغم من أن طاقة الرابطة $N\equiv C$ تساوي 2.1 eV . تحدث معظم التحللات بطاقة أقل من طاقة التردد القصوى والتي قد تتوزع بمعدل ثابت في جميع أنحاء الجزيء . ويفسر التردد القليل ما يحدث في التفاعلين التاليين :

$$^{127}TeO_3^{2-} \rightarrow {}^{127}IO_3^- + \beta^- \qquad (3-38)$$

$$^{52}MnO_4^- \rightarrow {}^{52}CrO_4^{2-} + \beta^+ \qquad (3-39)$$

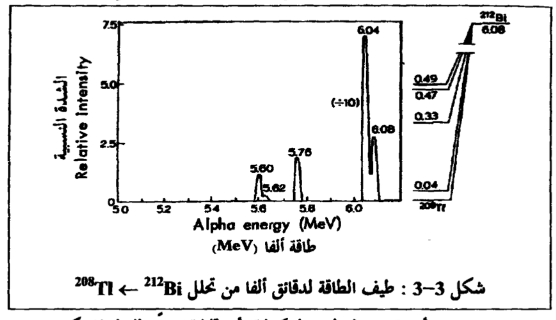
على الرغم من أن Ed تساوي أعشار الإلكترون فولت . وذلك لأن التأثيرات الثانوية ستؤدي إلى كسر الروابط الكيميائية بعد حدوث التحلل الإشعاعي .

3-5 التحلل بجاما Gamma Decay

نجد في أغلب الأحيان أن النواة البنت الناتجة عن تحلل α وبيتا في حالة تهيج. وتتخلص النواة البنت من طاقة التهيج إما بإطلاق أشعة جاما أو من خلال العملية المسماة بالتحول الداخلي **Internal Conversion** .

يبين الشكل (3-3) طيف دقائق ألفا المنطلقة من ^{212}Bi . ويلاحظ من الشكل السابق أن لمعظم دقائق ألفا طاقة تساوي 6.04 MeV وبحوالي 30٪ من الدقائق طاقة أقل أو أكثر . ويمكن تفسير هذا إذا افترضنا أن النوى البنت الناتجة ^{208}Tl من تحلل

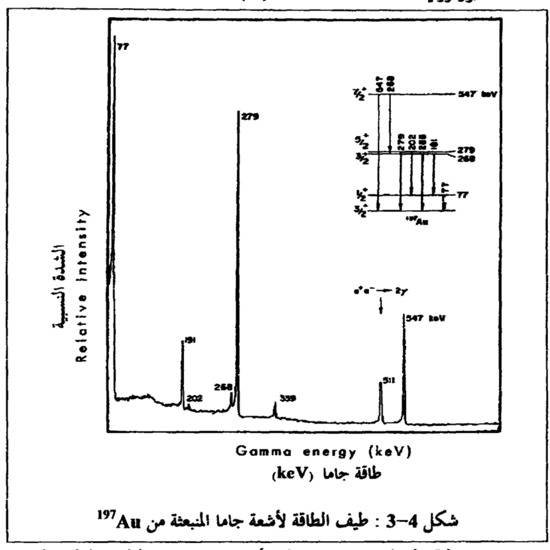
^{212}Bi موجودة في مستويات تهيج مختلفة . وأثبتت القياسات لطاقة أشعة جاما المنطلقة هذه الفرضية ، حيث أن طاقة γ تساوي الفرق ما بين أعلى طاقة ألفا 6.08 MeV وأقل طاقة . فعلى سبيل المثال هناك E_γ = 0.32 MeV نتيجة لوجود (E_γ = 6.08-5.76 MeV) 5.76 MeV = E_α . ويبين الشكل (3-3) مستويات الطاقة في ^{208}Tl .



شكل 3-3 : طيف الطاقة لدقائق ألفا من تحلل $^{212}Bi \leftarrow {}^{208}Tl$

يؤدي مرور أشعة جاما في الغاز إلى كثافة تأين قليلة جداً ، فلهذا لا يمكن عدها باستخدام عدادات التأين وجايجر والتناسب . بعد ذلك وجد العلماء أن أشعة جاما تؤدي إلى حدوث الفلورسنس في البلورات كبلورة يوديد الصوديوم NaI مما يعني أن إمكانية استخدام عدادات الوميض في عد أشعة جاما بصورة فعالة. كما يقاس طيف أشعة جاما بدقة عالية بواسطة جهاز كشف شبه موصل صلب . ويبين الشكل (3-4) طيف التحلل لمستويات التهيج المختلفة في ^{147}Au . وفي معظم الأحيان يحدث انطلاق جاما فوراً بعد تحلل ألفا أو بيتا ، أي في أقل من $\geq 10^{-12}$ ثانية . وفي بعض الحالات تبقى النواة في مستويات طاقة عالية لفترة من الزمن يمكن قياسها بسهولة ، وتسمى هذه النوى بالأيزومرز (و4-2) ومن الأمثلة على ذلك $^{60}Co^{m}$ الذي يتحلل بنصف عمر = 10.5 دقيقة إلى الحالة الأرضية ويسمى هذا التحلل

بالانتقال الأيزومرزي Isomeric Transition (IT) .



شكل 4-3 : طيف الطاقة لأشعة جاما المنبعثة من ^{197}Au

تتوزع طاقة التحلل بجاما ما بين طاقة أشعة جاما (E_γ) والطاقة الحركية للنواة الناتجة المرتدة (Ed) . أي أن Q_γ تساوي :

$$Q_\gamma = E_d + E_\gamma \qquad (3-40)$$

ويتبع التوزيع المعادلة التالية :

$$E_{d'} = E_\gamma^2 / 2m_d C^2 \qquad (3-41)$$

وتقدر طاقة $E_d < 0.1\%$ من E_γ . أي أن الطاقة الحركية للنواة المرتدة قليلة

جداً ويمكن إهمالها عند دراستنا لطاقة أشعة جاما .

ويمكن لأشعة جاما أن تتفاعل مع إلكترونات الأفلاك التابعة لذرات أخـرى ، مما يؤدي إلى طرد هذه الإلكترونات من ذراتها حاملـة معهـا طاقـة حركيـة محـددة . وقد تحدث هذه العملية ضمن نفس الذرة المتهيجة . وتسمى هذه العملية بـالتحول الداخلي IC . وذلك بسبب تداخل دالة الموجة لإلكترون الفلك مع تلـك الخاصـة بالنواة المتهيجة ، وينجم عن هذا انتقـال طاقـة التهيـج للنـواة مباشـرة إلى إلكـترون الفلك ، والذي سيهرب من الـذرة بطاقة حركيـة E_e . ولا تنطلـق أشـعة جامـا في التحول الداخلي ، وبهذه الطريقة تخسر النواة المتهيجة طاقتها .

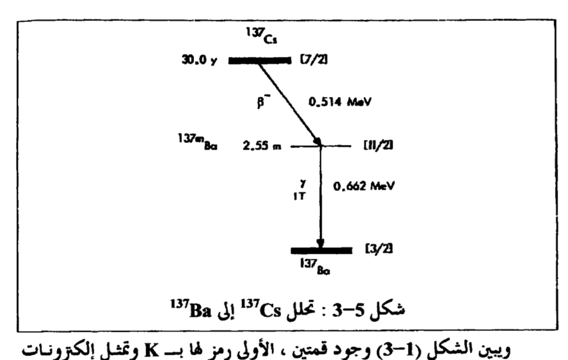
وتكتب معادلة التحول الداخلي كما يلي :

$$ {}_{Z}^{A}X^{m} \rightarrow {}_{Z}^{A}X^{+1} + {}_{-1}^{0}e \rightarrow {}_{Z}^{A}X \qquad (3-42) $$

ويستخدم جزء من طاقة التهيـج النـووي في التغلـب علـى طاقـة الربـط E_{be} لإلكترون الفلك ، أمـا البـاقي مـن طاقـة التهيـج فيتـوزع مـا بـين طاقـة الإلكـترون الحركية E_e وطاقة النواة البنت المرتدة E_d ، أي أن :

$$ Q_{\gamma} = E_{be} + E_d + E_e \qquad (3-43) $$

ويسمى الإلكـترون المنطلـق بإلكـترون التحـول Conversion Electron وفي الغالب تأتي هذه الإلكترونات من الأفلاك الداخلية للذرة وذلك لأن الدالة الموجية لهـم تتداخل بشكل كبير مع تلك للنواة . ولإلكترونات التحول طاقة ثابتـة E_e تعتمـد علـى طاقة ربط الإلكترون في الفلك ، وتعكس قيم E_e الفرق في طاقة ربط الإلكترونات .



شكل 5–3 : تحلل ^{137}Cs إلى ^{137}Ba

ويبين الشكل (1–3) وجود قمتين ، الأولى رمز لها بـ K وتمثل إلكترونات التحول القادمة من مستوى الطاقة الرئيسي K والثانية رمز لها بـ L وتمثل إلكترونات التحول القادمة من مستوى الطاقة الرئيسي L . وينتج كل هذا من تحلل $^{137}Ba^{m}$. ويبين الشكل (5–3) عملية تحلل $^{137}Cs \rightarrow {}^{137}Ba + \beta^{-}$.

ويتحلل $^{137}Ba^{m}$ بطريقتين ، الأولى بإطلاق أشعة جاما بطاقة 0.66 MeV والثانية المنافسة للأولى بالتحول الداخلي . وتسمى النسبة ما بين عدد إلكترونات التحول وعدد فوتونات γ المنطلقة في المنافسة بنسبة التحول α Conversion Ratio .

وتعني $\alpha_{K} = \frac{I_{eK}}{I\gamma}$ النسبة ما بين إلكترونات K المنطلقة (I_{ek}) وفوتونات γ المنطلقة I_{γ} . وفي الغالب فإن قيمة $\alpha_{K} < 0.1$ وأن $\alpha_{M}<\alpha_{L}<\alpha_{K}$ ... إلخ . أما في $^{137}Ba^{m}$ فإن $\alpha_{K} = 0.004$ وأن النسبة ما بين عدد إلكترونات التحول من K إلى عدد إلكترونات التحول من L تساوي 5 تقريباً .

3-6 الانشطار التلقائي Spontaneous Fission (SF)

إذا ازدادت شحنة النواة إلى قيم عالية ، نجم عن ذلك زيادة في عدم استقرار النوى ، ونلاحظ هذا في قيم نصف العمر للعناصر الثقيلة ، التي لها عدد ذري أكثر من اليورانيوم ($Z = 92$) إذ تقل كلما ازداد العدد الذري . وفي عام 1940 اكتشف العالمان بيترجاك وفليسوف أن هناك طريقة أخرى لتحلل اليورانيوم ^{238}U الإشعاعي بالإضافة إلى دقائق ألفا وهي الانشطار التلقائي (SF) وأن هناك تنافساً بين الطريقتين . وينتج عن الانشطار التلقائي جزئين ثقيلين (نواتج الانشطار) بالإضافة إلى بعض النيوترونات كما هو مبين في المعادلة التالية :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}X_1 + {}^{A_2}_{Z_2}X_2 + \#n \qquad (3-44)$$

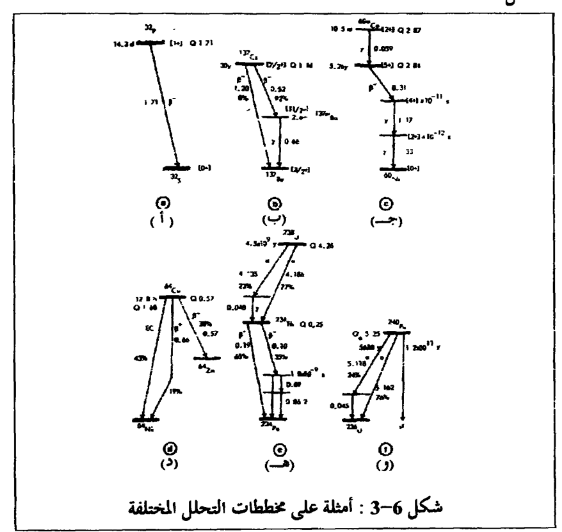
حيث أن # هو عدد النيوترونات والذي يساوي من 2 إلى 3 نيوترونات . وأما قيمة نصف العمر للانشطار التلقائي ($t_{1/2SF}$) لليورانيوم 238 فتساوي 8×10^{15} سنة وهذه القيمة أكبر بكثير من $t_{1/2}$ لتحلل ألفا . أي أن هناك حوالي 70 انشطار تلقائي في الثانية في 1كغم ^{238}U وفي المقابل هناك انطلاق لـ 45×10^{9} دقيقة من ألفا .

وكلما ازدادت Z ازداد الانشطار التلقائي فنقصت قيمة $t_{1/2}$ له . ومن الأمثلة على ذلك 1.2×10^{11} سنة = $t_{1/2(SF)}$ $^{240}_{94}Pu$ و 1.4×10^{7} سنة = $t_{1/2(SF)}$ $^{244}_{96}Cm$ و 66 سنة = $t_{1/2(SF)}$ $^{252}_{98}Cf$ و 3×10^{-4} سنة = $t_{1/2(SF)}$ $^{256}_{100}Fm$. وفي الحقيقة فإن الانشطار التلقائي يصبح المسيطر في العناصر الأكثر ثقلاً ($Z>100$) . وهناك وجه شبه بين الانشطار التلقائي وغير التلقائي الناجم عن قذف النوى بنيوترونات ذات طاقة قليلة .

3-7 مخططات التحلل وخريطة النظائر

Decay Schemes and Isotope Charts

يحصل القارئ من مخططات التحلل على المعلومات التالية : نمط (طريقة) التحلل وطاقة التحلل وفترة نصف العمر ويبين الشكل (6-3) عدد من مخططات التحلل .



شكل 6-3 : أمثلة على مخططات التحلل المختلفة

تكتب فترة نصف العمر $t_{1/2}$ إلى يسار الخط الذي يمثل مستوى الطاقة للنواة المتحللة ، وتعطى قيمة الغزل النووي لكل مستوى على يمين المستوى وداخل

قوسين مربعين . وفي نفس الجهة تعطى قيمة Q لذلك التحلـل . وتستخدم الرموز المعروفة التالية α و β و γ و E.C للدلالة على طريقة التحلل ، ويكتب إلى جانبها طاقة ذلك التحلل والنسبة المئوية له .

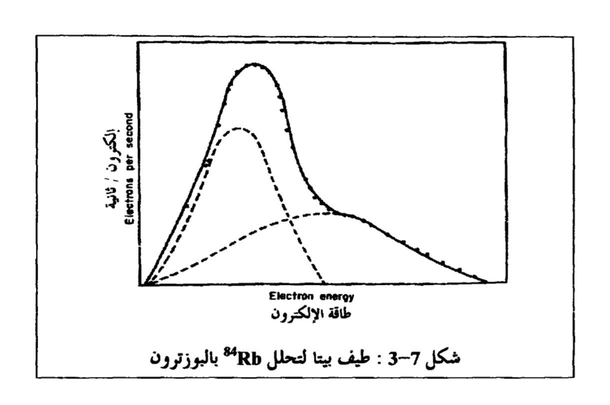
يمثل الشكل (3–6 أ) تحلل β^- لـ ^{32}P ، أما (3–6 ب) فيمثل مخطط التحلل لـ ^{137}Cs والذي يختلف عن الشكل (3–5) والمنحنى في (3–1) . والسبب يعود إلى أن نسبة الإلكترونات المنطلقة بطاقة 1.2 MeV قليلة تساوي 8٪ فقط ولهذا فإنه من الصعب الكشف عنها في جهاز الطيف المغناطيسي . ومن الشائع أن نجد نوى تتحلل بأكثر من طريقة تحلل تتنافس فيما بينها كما هو في المثال (3–6 ب) . وإذا كانت نسبة تحلل بيتا ذات الطاقة العالية قريبة من تلك ذات الطاقة القليلة حصلنا على طيف مشترك لبيتا كما هو مبين في الشكل (3–7) .

يبين الشكل (3–6 جـ) مخطط التحلل لـ ^{60}Co ولأيزومره $^{60}Co^m$. ويلاحظ وجود تحللان لغاما مباشرة بعد التحلل ببيتا .

أما الشكل (3–6 د) فيوضح ظاهرة التحلل المتفرع لـ ^{64}Cu ، حيث أنه يتحلل بالنيغاترون ونسبته (38٪) وبالبوزوترون ونسبته (19٪) وباقتناص الإلكترون (43٪) ويلاحظ أيضاً أن $Q_{E.C}$ أكبر من Q_{β^+} بـ 1.02 = 1.68-0.66 MeV . وأما الشكل (3–6 هـ) فيوضح تحلل ^{238}U بألفا إلى ^{234}Th وتحلل ^{234}Th ببيتا سالب إلى ^{234}Pa .

وأخيراً يبين الشكل (3–6 و) التنافس ما بين الانشطار التلقائي والتحلل بألفا في ^{240}Pu .

وأما خريطة النظائر (ملحق ب) فتمثل كل النظائر المعروفة لحد الآن وهي مفيدة جداً في التعرف السريع على صفات كل نظير وعلى نتائج التحللات .



شكل 7–3 : طيف بيتا لتحلل ^{84}Rb بالبوزترون

3-8 العمليات والتفاعلات الثانوية في الذرة

Secondary Process in the Atom

إذا انطلق إلكترون من فلك ذري بسبب التحول الداخلي (IC) أو اقتناص الإلكترون (EC) أو أي تفاعل ناجم عن التحلل الإشعاعي ، تكون فراغ في ذلك الفلك . ويجب أن يملأ هذا الفراغ بعدة طرق منها قدوم إلكترون من فلك له طاقة أعلى ليحتل الفراغ . وأما الفرق في طاقة الربط بين الفلكين فتظهر على شكل أشعة إكس . وتسمى هذه العملية بإشعاع الفلورسنت **Flourescent Radiation** .

وإذا كان الفرق في طاقة الربط أكثر من طاقة الربط لإلكترون في المستوى L أو M ظهرت عملية منافسة لإشعاع الفلورسنت تسمى بعملية الكهروضوئية الداخلية ، حيث ينطلق ذلك الإلكترون حاملاً معه الفائض من الفرق في طاقة الربط عن طاقة ربطه ، وهذا يعني

انطلاق إلكترونات من الأفلاك العليا ذات طاقة حركية قليلة وتسمى هذه الإلكترونات بإلكترونات آوجه Auger Electrons . وإذا قارنا بين طاقة هذه الإلكترونات المنطلقة وطاقة الإلكترونات المنطلقة من التحول الداخلي النووي ، نجد أن طاقتها قليلة وفي حدود eV بينما طاقة الإلكترونات الناتجة عن IC في حدود MeV . وينجم عن انطلاق إلكترونات آوجه في الذرة شحنة موجبة عالية قد تصل من 10 إلى 20 وحدة شحنة . وإذا تم معادلة هذه الشحنة العالية نجم عن ذلك طاقة عالية تكفي لكسر الروابط الكيميائية.

وجد العلماء أن طاقة γ في التحلل الأيزومري (IT) قليلة ، مما يعني أن طاقة الارتداد للبنت معدومة . ومن الأمثلة على ذلك :

$$^{80}Br^{m} \rightarrow {}^{80}Br + \gamma$$

وطاقة γ هي 0.049 MeV وطاقة الارتداد للبنت هي 0.016 eV . وعلى الرغم من ذلك يؤدي التحلل إلى انطلاق ^{80}Br من جزيء بروميد الإيثيل C_2H_5Br المحتوي على $^{80}Br^{m}$ ($C_2H_5\,{}^{80}Br^{m}$) ، علماً أن طاقة الرابطة $C\text{-}{}^{80}Br^{m}$ تساوي 2.3eV . وينجم هذا عن التحول الداخلي لجاما الذي ينتج عنه فراغ ومن ثم انطلاق إلكترونات أوجه . وهذا سيؤدي إلى تكون أيونات بروم موجبة تتراوح من Br^{+} إلى Br^{17+} . وانطلاق ^{80}Br ناجم عن الطاقة الناتجة عن معادلة هذه الشحنة الموجبة العالية ، وهذه الطاقة كافية لكسر الرابطة $C - {}^{80}Br$.

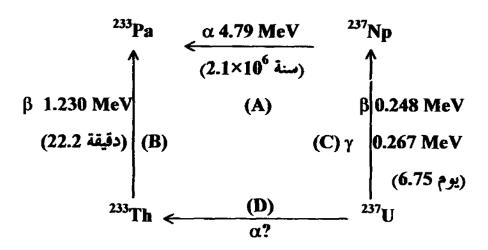
3-8 طاقة حلقة التحلل المغلقة

Closed Decay Energy Cycles

لم يتمكن العلماء من قياس الكتلة للنظائر المشعة ذات نصف العمر القليل على الرغم من أن طاقة وطريقة التحلل قد تم التعرف عليهما وتحديدهما . وإذا استخدمنا طاقة

حلقة التحلل المغلقة حصلنا على الكتل النووية وقيم Q لطرق تحلل مختلفة وغير معروفة .

فإذا أردنا معرفة ما إذا كان ^{237}U يتحلل إلى ^{233}Th بواسطة ألفا دون معرفتنا للكتل النووية . قمنا ببناء الحلقة التالية : يتحلل ^{233}U ببيتا (E_{max} 0.248 MeV) ومن ثم بجاما (E_γ 0.267 MeV) ، يتحلل ^{233}Th ببيتا (E_{max} 1.230 MeV) إلى ^{233}Pa ، يتحلل ^{237}Np بألفا إلى ^{233}Pa بطاقة E_α = 4.79 MeV .



فقيمة Q للفرع D = $931.5\left(M_{^{237}U} - M_{He} - M_{^{233}Th}\right)$ ، وأما Q للفرع (A) فتساوي $\left(M_{^{237}Np} - M_{He} - M_{^{233}Pa}\right)$ $= 931.5$ $= 4.79\ \frac{237}{233}$ $= \frac{E_\alpha M_Z}{M_{Z-2}}$ Q . وبالتعويض بقيم M_{He} و $M_{^{237}Np}$ نحصل على $M_{^{233}Pa} = 233.040108$.

وقيمة $M_{^{233}Th}$ للفرع (B) تساوي

$$M_{^{233}Th} = M_{^{233}Pa} + \frac{1.230}{931.5} = 233.041428$$

ومن الفرع (C) نحصل على

$$M_{^{237}U} = M_{^{237}Np} + (0.248 + 0.267)/931.5 = 237.048581$$

أي أن جميع المعلومات قد توفرت لحساب الفـرع (D) ، وقيمـة Q لـه 4.23 MeV و $E_\alpha = 4.23 \times \frac{233}{237} = 4.16$ MeV ، أي أن التحلـل بألفا ممكـن مـن ناحية الطاقة ، ولكن لم يتم الكشف عنه بعد وقدر العلماء نصف العمر له بأكثر من 10^6 سنة ، ويعزى هذا إلى سرعة التحلل ببيتا ($t_{1/2} = 6.75$ يوم) العاليـة مما يجعـل التحلل ببيتا هو المسيطر على التحلل بألفا .

الأسئلة :

1) إذا علمت أن ^{239}Pu يطلق دقائق ألفا بطاقة قصوى تساوي 5.152 MeV ، فاحسب طاقة الارتداد للنواتج .

2) يتحلل ^{11}C بإطلاق البوزترونات وبطاقة قصوى تساوي 1.0 MeV ، احسب طاقة الارتداد للبنت .

3) يتحلل ^{16}N إلى ^{16}O ببيتا ناقص ، فإذا انطلقت أشعة جاما بعد ذلك ، وكانت أعلى طاقة لها 6.14 MeV ، فاحسب طاقة الارتداد لـ ^{16}O .

4) احسب Q لكل من :

أ) تحلل $^{14}_{6}C$ إلى $^{14}_{7}N$ بواسطة β^- .

ب) تحلل $^{234}_{90}Th$ إلى $^{230}_{88}Ra$ بواسطة α .

جـ) تحلل $^{95}_{45}Rh$ بواسطة β^+ و E.C .

د) تحلل $^{99}_{43}Tc^m$ إلى $^{99}_{43}Tc$ بواسطة γ .

5) إذا كانت طاقة الربط لإلكترون K في الباريوم 37441 eV . فاحسب من الشكل (1–3) طاقة التحول الداخلي لـ $^{137}Ba^m$ (الشكل 5–3) .

6) إذا انشطر $^{240}_{94}Pu$ إلى $^{118}_{47}Ag$ حسب المعادلة التالية :

$$^{240}_{94}Pu \rightarrow 2\,^{118}_{47}Ag + 4n$$

فاحسب Q للانشطار التلقائي .

الفصل الرابع

معادلات تحلل ونمو النشاط الإشعاعي

EQUATIONS OF RADIOACTIVE DECAY AND GROWTH

4-1 مقدمة

وضع العالم أي.فون. شريلدر عام 1905 وصف جديد لعملية التحلل الإشعاعي مبني على احتماليات التحلل . فقال أن احتمالية التحلل (p) لذرة معينة من عنصر مشع في فترة زمنية Δt لا تعتمد على تاريخ العينة ولا على الظروف الحالية ، وتعتمد فقط على طول الفترة الزمنية Δt ، وفي حال قصر الفترة الزمنية فإنها تتناسب طردياً مع Δt . أي أن :

$$P = \lambda\Delta t \qquad (4-1)$$

و λ هو ثابت التناسب (ثابت التحلل) ، ولكل نواة مشعة قيمة لـ λ خاصة بها . واحتمالية أن لا تتحلل ذرة معينة خلال الفترة القصيرة Δt يساوي :

$$1-P = 1-\lambda\Delta t \qquad (4-2)$$

وإذا لم تتحلل تلك الذرة خلال الفترة الأولى فإن احتمالية تحللها في الفترة القادمة تساوي $1-\lambda\Delta t$ وهكذا لفترات قادمة . أما احتمالية أن لا تتحلل تلك الذرة خلال عدد n من الفترات فيساوي $(1-\lambda\Delta t)^n$. وبتعويض الزمن الكلي $n\Delta t = t$ في المعادلة $(1-\lambda\Delta t)^n$ حصلنا على احتمالية للبقاء تساوي :

$$\left(1-\frac{\lambda t}{n}\right)^n \qquad (4-3)$$

واحتمالية أن لا تتغير الذرة بعد زمن t يساوي قيمة المقدار (4-3) على شرط أن تكون Δt صغيرة جداً . وهذا يساوي نهاية $\left(1-\frac{\lambda t}{n}\right)^n$ عندما تؤول n إلى ما لا نهاية . وبالرجوع إلى قيمة e^X والتي تساوي $\left(1-\frac{X}{n}\right)^n$ $\lim_{n\to\infty}$ ، فإن

القيمة المحددة تساوي $e^{-\lambda t}$.

وإذا أخذنا بالاعتبار عدد كبير من الذرات N_0 في البداية ، فإن الجزء الباقي بدون تغيير بعد زمن t سيساوي :

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \qquad (4-4)$$

حيث أن N هو عدد الذرات الباقي الذي لم يتغير بعد زمن t و N_0 عدد الذرات عند زمن صفر = t .

وتمثل المعادلة (4–4) قانون التحلل الأسي الذي يتطابق مع ما وجده العالم رذرفورد عملياً عند دراسته لنشاط عينة مشعة معزولة ونقية .

ويمكننا أن نشتق القانون (4–4) بطريقة أخرى مبنية على علاقة سرعة التحلل $-\frac{dN}{dt}$ الطردية مع عدد الذرات N . وإذا استخدمنا ثابت التناسب λ حصلنا على المعادلة التالية :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \qquad (4-5)$$

وبتكامل الطرفين حسب الشروط السابقة ($N = N_0$ عند صفر = t) نحصل على $N = N_0 e^{-\lambda t}$.

ولثابت التحلل λ (ثابت التناسب سابقاً) وحدة معكوس الزمن . ولا يتغير ثابت التحلل لنظير ما مشع مهما تغيرت ظروف التجربة مثل درجة الحرارة والصيغة الكيميائية والضغط والمجال الأرضي والمغناطيسي والكهربائي .

وتعرف فترة نصف العُمر $t_{1/2}$ رياضياً كما يلي : عندما تساوي $t = t_{1/2}$ فإن $N = \frac{N_0}{2}$ ، وبالتعويض في المعادلة (4–4) نحصل على :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \qquad (4-6)$$

وباختصار N_0 من الطرفين ثم أخذ اللوغاريتم للطرفين نحصل على :

$$\text{lin}\frac{1}{2} = -\lambda t_{1/2} \qquad (4\text{–}7)$$

أو (7–4)

$$\text{lin}\ 2 = \lambda\ t_{1/2}$$

وبتعويض قيمة lin 2 = 0.693 في المعادلة (7–4) ، فإن :

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad (4\text{–}8)$$

لا يمكن عملياً تحديد عدد ذرات المادة المشعة N بطريقة مباشرة ، ولا حتى قياس سرعة التحلل المطلقة . وإنما يجري تحديد كمية تتناسب طردياً مع λN وتسمى بالنشاط Activity A ، أي أن :

$$A = C\lambda N = C\left(\frac{-dN}{dt}\right) \qquad (4\text{–}9)$$

حيث أن C هو ثابت التناسب أو معامل الكشف **Detection coefficient** الذي يعتمد على طبيعة أداة الكشف وعلى فعالية الأداة في الكشف عن الإشعاعات وعلى الترتيب الهندسي للعينة وللكاشف . ولهذا ينصح الدارس على إبقاء هذه العوامل ثابتة خلال القياسات .

يمكننا أن نكتب قانون التحلل الأسي (معادلة 4–4) بدلالة النشاط الإشعاعي كما يلي :

$$A = A_0\, e^{-\lambda t} \qquad (4\text{–}10)$$

ويستخدم الرسم البياني للعلاقة بين log A والزمن t في حساب فترة نصف العُمر $t_{1/2}$ لبعض النظائر .

4-2 معدل العمر Average Life (T)

يمكن حساب معدل العمر المتوقع لذرات أي عنصر مشع من خلال جمع أعمار كل الذرات وقسمته على عدد الذرات الأصلي . فإذا كان عدد الذرات N كبير جداً فإن معدل العمر سيساوي التكامل التالي :

$$T = -\frac{1}{N_0}\int_{t=0}^{t=\infty} t dN = \frac{1}{N_0}\int_0^{\infty} t \quad \lambda N dt$$
$$= \lambda \int_0^{\infty} t \frac{N}{N_0} \quad dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} \quad dt$$
$$= -\left[\frac{\lambda t + 1}{\lambda} e^{-\lambda t}\right]_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} \qquad (4-11)$$

أي أن معدل العمر أكبر من نصف العمر بمقدار $\frac{1}{0.693}$. كما أن النشاط الإشعاعي ينقص خلال فترة معدل العمر إلى $\frac{1}{e}$ من قيمته الأصلية . فمعدل العمر لـ ^{14}C هو :

$$T_{^{14}C} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\frac{0.693}{t_{1/2}}} = \frac{1}{\frac{0.693}{5730 \text{ سنة}}} = 8268.4 \text{ سنة}$$

4-3 تحلل المخاليط المشعة

Decay of Radioactive Mixtures

تعرف المخاليط المشعة على أنها مخلوط من مادتين أو أكثر مشعة ومستقلة في التحلل الإشعاعي عن بعضها البعض .

فلو افترضنا أن المخلوط مكون من مادتين 1 و 2 . فإن النشاط الإشعاعي الكلي A سيساوي مجموع النشاط الإشعاعي لكل من 1 و 2 كما يلي :

$$A = A_1 + A_2 \qquad (4-12)$$

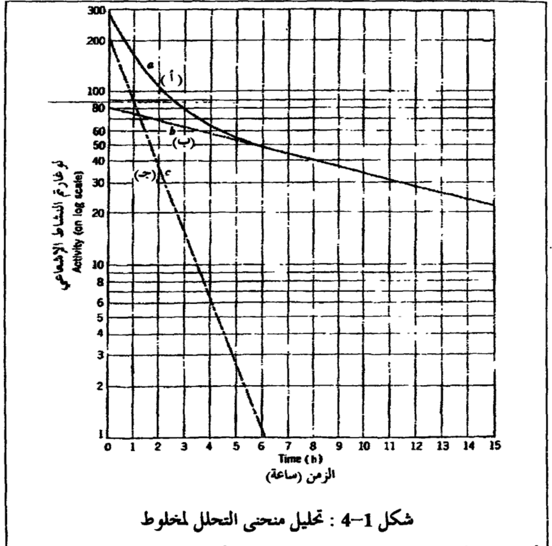
أي أن :

$$A = C_1\lambda_1 N_1 + C_2\lambda_2 N_2 \qquad (4-13)$$

حيث أن C_1 و C_2 هما معاملي الكشف لـ 1 و 2 ، وليس من الضروري أن تكون $C_1 = C_2$ ، وفي أغلب الأحيان هناك فرق كبير . وبشكل عام فإن النشاط الإشعاعي الكلي لعينة مخلوط مكونة من n مادة مشعة هو :

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + ... + A_n \qquad (4-14)$$

فإذا أخذنا المخلوط الأول (معادلة 12 و 13–4) ورسمنا log A (لوغاريتم النشاط الإشعاعي الكلي) ضد الزمن t حصلنا على منحنى محدب (الشكل 1–4). وينتج الانحناء عن التحلل السريع للنظير ذا نصف العمر القصير ، مما يقلل من أهميته مع مرور الزمن ويزيد من أهمية النظير ذا نصف العمر الطويل. ولهذا يظهر الجزء الأخير من المنحنى وكأنه خط مستقيم.



شكل 1–4 : تحليل منحنى التحلل لمخلوط

أ) منحنى تحلل المخلوط   ب) النظير ذا العُمر الطويل (8 ساعة = $t_{1/2}$)

جـ) النظير ذا العُمر القصير (0.8 ساعة = $t_{1/2}$)

وتحسب $t_{1/2}$ مباشرة من ميل هذا الخط والعلاقة (8–4) .

ويمكن حساب $\log A_{طويل}$ من تقاطع امتداد الخط المستقيم مع محور ص عند صفر = t . ومن معرفتنا لقيمة $\log \frac{A_{طويل}}{2}$ تحسب $t_{1/2}$ لذلك النظير بطريقة أخرى . وإذا تم طرح امتداد الخط المستقيم من المنحنى حصلنا على تحلل جميع المكونات ما عدا النظير ذا العمر الطويل . وفي حال وجود مكون آخر فقط فإنه يمكن الحصول على خط مستقيم يمثل تحلل النظير ذا العمر القصير ، وذلك برسم لوغاريتم (حاصل الطرح) ضد الزمن كما هو مبين في الشكل (1–4) . ومن الصعب تحليل المنحنى إلى مكوناته إذا كان الفرق في نصف العمر لا يقل عن الضعف ، ويبين الشكل (1–4) منحنى مكون من نظيرين والفرق بينهم عشرة أضعاف .

اقترح العلماء الطريقة الرياضية التالية لتحليل منحنى مكون من نظيرين لهما أنصاف أعمار معروفة ولكن قريبة من بعضها البعض .

النشاط الإشعاعي الكلي عند زمن t يساوي

$$A = A_1^0 e^{-\lambda_1 t} + A_2^0 e^{-\lambda_2 t} \qquad (4-15)$$

وإذا ضربنا طرفي المعادلة بـ $e^{\lambda_1 t}$ حصلنا على

$$Ae^{\lambda_1 t} = A_1^0 + A_2^0 e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t} \qquad (4-16)$$

وبما أن λ_1 و λ_2 معروفتان وقيم A مقاسة مع الزمن ، نستطيع أن نرسم $Ae^{\lambda_1 t}$ ضد $e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t}$ فنحصل على خط مستقيم بميل يساوي A_2^0 وتقاطع يساوي A_1^0 .

4-4 نمو النواتج المشعة

Growth of Radioactive Products

4-4-1 المعادلة العامة :

لندرس الحالة العامة لتحلل مادة مشـعة (1) والـتي تعطي بنـت مشـعة (2) .

فالمعادلات التي تحكم N_1 هي :

$$-\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1 \qquad \text{و} \qquad N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$$

أما البنت المشعة فإنها تتحلـل بسـرعة $\lambda_2 N_2$ وتنمـو بسـرعة $\lambda_1 N_1$ ، أي أن معدل التغير في N_2 مع الزمن هو :

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \tag{4-17}$$

أو

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 - \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t} = \text{صفر}$$

وحل هذه المعادلة هو :

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) + N_2^0 e^{-\lambda_2 t} \tag{4-18}$$

حيث أن N_2^0 هي قيمة N_2 عند صفر = t . ويبين المقـدار الأول العلاقة بين نمو البنت من الأب والتحلل الإشعاعي الخاص فيها وأما المقدار الثاني فهو تحلل ذرات البنـت الموجودة أصلاً ، وعندما تكون عينة الأب نقية كيميائياً فإن N_2^0 متساوي صفراً .

4-4-2 الاتزان العابر Transient Equilibrium

إذا كان نصف عمر الأب أكبر من نصف عمر البنت (($t_{1/2}(1) > t_{1/2}(2)$ أو $\lambda_1 < \lambda_2$) وجدت حالة من الاتزان في التحلل الإشعاعي ، حيث تثبـت النسـبة بـين عدد الذرات أو سرعة التحلـل الأب إلى البنـت بعـد مـرور زمـن معـين . وتُوضـح

هذه الحالة من خلال المعادلة (4-18) كما يلي : فعندما يصل الزمن t إلى قيمة كبيرة فإن $e^{-\lambda_2 t}$ تصبح عديمة القيمة بالمقارنة مع $e^{-\lambda_1 t}$ فتأخذ المعادلة (4-18) صيغة جديدة هي (4-19) .

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \qquad (4-19)$$

وبالتعويض في مكان $N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$ بـ N_1 نحصل على :

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 \qquad (4-20)$$

وبدلالة النشاط الإشعاعي نحصل على

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{C_1(\lambda_2 - \lambda_1)}{C_2 \lambda_2} \qquad (4-21)$$

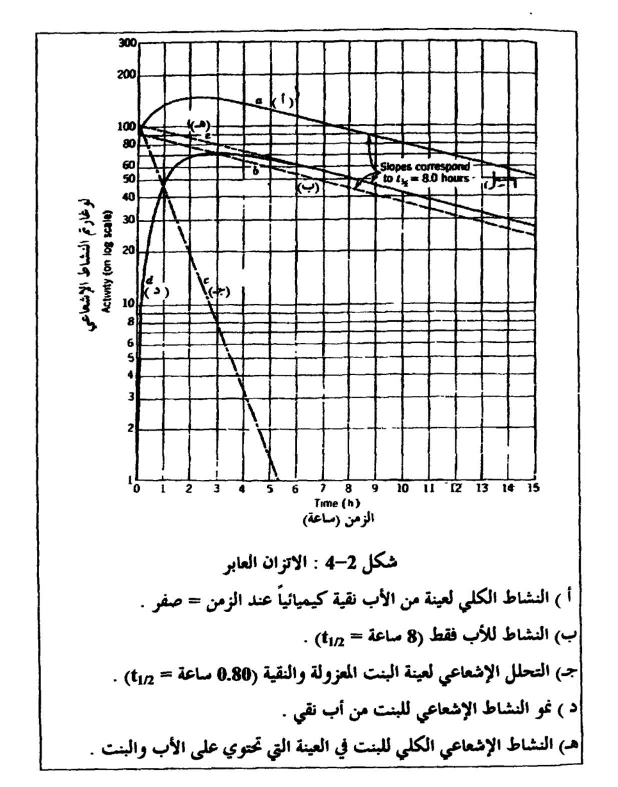
حيث أن $A_1 = C_1 \lambda_1 N_1$ و $A_2 = C_2 \lambda_2 N_2$.

وفي حال أن $C_2 = C_1$ فإن :

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2} = 1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \qquad (4-22)$$

وتأخذ النسبة $\frac{A_1}{A_2}$ قيم من $0 \leftarrow 1$ بالاعتماد على نسبة $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$.

ففي الاتزان يرتبط تحلل الأب والبنت الإشعاعي بنصف عمر الأب . ويبين الشكل (4-2) الاتزان العابر ، ونلاحظ من الشكل (4-2) كيف أن مجموع سرعتي التحلل للأب والبنت الناجمة عن عينة من الأب نقية كيميائياً تزداد إلى أقصى قيمة لها قبل أن تصل إلى الاتزان العابر . وشرط القيمة القصوى هو أن تكون $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} < \frac{C_2}{C_1}$ بغض النظر عن قيم λ_1 و λ_2 .



شكل 2–4 : الاتزان العابر

أ) النشاط الكلي لعينة من الأب نقية كيميائياً عند الزمن = صفر .

ب) النشاط للأب فقط (8 ساعة = $t_{1/2}$) .

جـ) التحلل الإشعاعي لعينة البنت المعزولة والنقية (0.80 ساعة = $t_{1/2}$) .

د) نمو النشاط الإشعاعي للبنت من أب نقي .

هـ) النشاط الإشعاعي الكلي للبنت في العينة التي تحتوي على الأب والبنت .

4-4-3 الاتزان القرني Secular Equilibrium

تحــدث هــذه الحالــة المحــددة مــن الاتـــزان عندمـــا تكـــون $\lambda_1<<\lambda_2$ أو $t_{1/2}(2)<<t_{1/2}(1)$. فلا ينقص النشاط الإشعاعي للأب خلال فترة نصف العمـر أو فترات نصف العمر للبنت .

وإذا اسـتخدمنا المعادلـة (4–20) وطبقنـا عليهـا الشـرط $\lambda_1<<\lambda_2$ ، فـإن $\lambda_2\approx\lambda_2-\lambda_1$ أي أن :

$$\frac{N_1}{N_2}=\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \qquad (4-23)$$

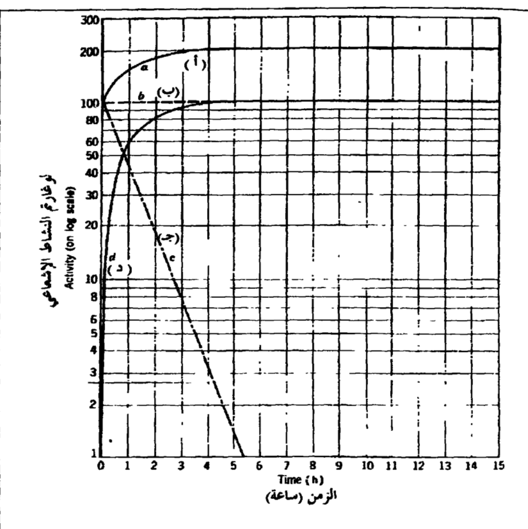
أو (4–23)

$$N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2$$

وبالتعويض بدلالة النشاط الإشعاعي نحصل على :

$$\frac{A_1}{A_2}=\frac{C_1}{C_2} \qquad (4-24)$$

وإذا كانت $C_2 = C_1$ فإن $A_1 = A_2$ ويبين الشكل (3–4) الاتزان القرنـي ، ونلاحظ من الشكل كيف أن النشاط الإشعاعي للأب ثابت لا يتغـير ضمـن الزمـن الذي يساوي مضاعفات لفترة نصف عمر البنت . ويتبع مجموع النشاط الإشـعاعي لـلأب والبنـت نفـس تصـرف الأب . وكلمـا أصبحـت λ_1 أصغـر مـن λ_2 اقـترب الاتزان العابر من الاتزان القرني .



شكل 3–4 : الاتزان القرني

أ) النشاط الكلي لعينة من الأب نقية كيميائياً عند الزمن = صفر .

ب) النشاط للأب فقط ($t_{1/2} = \infty$) ، وهذا يساوي النشاط الكلي للبنت في العينة التي تحتوي على الأب والبنت .

جـ) التحلل الإشعاعي لعينة البنت المعزولة والنقية ($t_{1/2} = 0.80$ ساعة) .

د) نمو النشاط الإشعاعي للبنت من أب نقي .

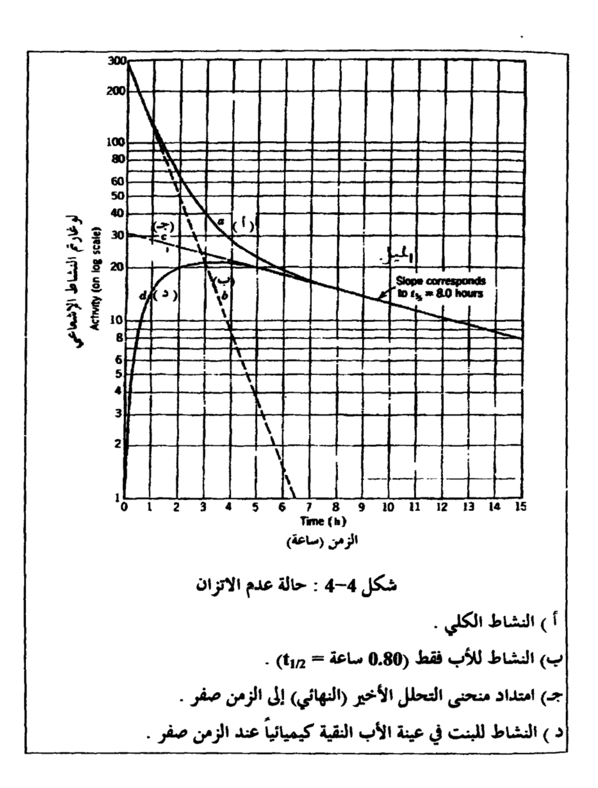
4-4-4 حالة عدم الاتزان Case of No Equilibrium

إذا كانت فترة نصف العمر للأب أصغر بكثير من تلك للبنت ، فإننا لن نصل إلى اتزان عند أي زمن . وإذا تتبعنا عينة من الأب نقية كيميائياً ، لاحظنا نمو البنت بسرعة نتيجة تحلل الأب السريع وبعد أن تصل كمية البنت إلى أقصى قيمة لها تبدأ بالتحلل من خلال فترة نصف العمر الخاصة بها . ويبين الشكل (4−4) هذه الحالة ($\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 10$ و $C_2 = C_1$) . يلاحظ من الشكل أن تحلل البنت الأسي الأخير مرتبط بنصف عمر البنت وهو خط مستقيم امتداده إلى صفر = t يساوي $C_2\lambda_2N_1^0$ إذا كانت $\lambda_2 << \lambda_1$. وتساوي N_1^0 امتداد لقيمة N_2 عند صفر = t .

فالنسبة بين النشاط الأولي $C_1\lambda_1N_1^0$ و $C_2\lambda_2N_1^0$ تساوي :

$$\frac{C_1\lambda_1N_1^0}{C_2\lambda_2N_1^0} = \frac{C_1}{C_2}\quad\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{C_1}{C_2}\frac{t_{1/2}(2)}{t_{1/2}(1)} \qquad (4-25)$$

وفي حال أن λ_2 ليست عديمة القيمة بالمقارنة مع λ_1 استبدلنا $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ بالنسبة $(\lambda_1 - \lambda_2)/\lambda_2$ مما سيؤثر على المقدار الذي يمثل علاقة أنصاف العمر مع بعضها البعض ليساوي $\frac{t_{1/2}(2) - t_{1/2}(1)}{t_{1/2}(1)}$.



شكل 4–4 : حالة عدم الاتزان

أ) النشاط الكلي .

ب) النشاط للأب فقط ($t_{1/2}$ = 0.80 ساعة) .

جـ) امتداد منحنى التحلل الأخير (النهائي) إلى الزمن صفر .

د) النشاط للبنت في عينة الأب النقية كيميائياً عند الزمن صفر .

يمكن دراسة الاتزان العابر وحالة عدم الاتزان من خلال t_{max} ، وهي الفترة الزمنية اللازمة لوصول البنت إلى أعلى قيمة نشاط لها وذلك من نموها من عينة أب نقية كيميائياً . وللحصول على t_m نفاضل المعادلة (4-18) بالنسبة للزمن كما يلي:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{\lambda_1^2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_2 t} \qquad (4-26)$$

وبالتعويض بـ t_{max} في مكان t عندما $\frac{dN_2}{dt}$ = صفر نحصل على :

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t_{max}} \qquad (4-47)$$

أو

$$t_{max} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \text{lin} \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

أي أن سرعة تحلل البنت $\lambda_2 N_2$ تساوي سرعة نموها عند t_{max} (شكل 2-4 و 4-4) ، وأما في حالة الاتزان القرني فإن t_m تساوي مالا نهاية .

4-5 التحللات المتتابعة Succesive Decays

إذا أخذنا بعين الاعتبار سلسلة من ثلاث أو أكثر من النواتج المشعة ، وجب علينا إيجاد معادلة لـ N_3 تختلف عن معادلة (4-4) لـ N_1 ومعادلة (4-18) لـ N_2 ، وهذه المعادلة تأتي من حل المعادلة التفاضلية التالية :

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \qquad (4-28)$$

وقد قام العالم هـ. باتمن بحل هذه المعادلة بحيث تشمل n من أعضاء السلسلة. وافترض أن قيمة صفر = N_n^0 ..... = N_3^0 = N_2^0 عند t = صفر . وحصل على الحل التالي :

$$N_n = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + ... + C_n e^{-\lambda_n t} \qquad (4-29)$$

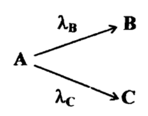
حيث أن
$$C_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)\ldots\ldots(\lambda_n - \lambda_1)} N_1^0$$

و
$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)\ldots\ldots(\lambda_n - \lambda_2)} N_1^0$$

وهكذا .

4-6 التحلل المتفرع Branching Decay

وهي إمكانية تحلل النظير المشع بأكثر من طريقة .



λ_β و λ_C هما ثابتا التحلل الجزئيين لكل من B و C .

ويتكون B بالسرعة التالية :

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_B N_A \qquad (4-30)$$

أما A فيستهلك أو يتحلل بالسرعة التالية :

$$\frac{dN_A}{dt} = -(\lambda_B + \lambda_C) N_A \qquad (4-31)$$

وللنواة A فترة نصف عمر خاصة بها $\frac{0.693}{\lambda_t} = t_{1/2}(A)$

وتساوي $\lambda_t = \lambda_B + \lambda_C + \ldots\ldots\ldots + \lambda_n$ ، أي أن نصف العمر مرتبط بسرعة التحلل الكلية بغض النظر عن ميكانيكية التحلل . ويحسب ثابت التحلل الجزئي بضرب ثابت التحلل الكلي في نسبة ذلك التحلل ، فعلى سبيل المثال يتحلل

^{64}Cu باقتناص الإلكترون E.C ونسبته 43٪ وبإطلاق الإلكترون السالب ونسبته 38٪ وبإطلاق الإلكترون الموجب ونسبته 19٪ ، فإذا كان نصف العمر لـ ^{64}Cu 12.8 ساعة ، فإن ثابت التحلل الكلي λ_T 0.0541 ساعة$^{-1}$. وثوابت التحلل الجزئية تساوي :

$\lambda_{E.C} = 0.43 \times 0.0541 =$ 0.0233 ساعة$^{-1}$

$\lambda_{\beta^-} = 0.38 \times 0.0541 =$ 0.0206 ساعة$^{-1}$

$\lambda_{\beta^+} = 0.19 \times 0.0541 =$ 0.0103 ساعة$^{-1}$

ومن قيم الثوابت الجزئية نحصل على قيم نصف العمر الجزئية التالية :

$t_{1/2}(E.C) =$ 29.7 ساعة

$t_{1/2}(\beta^-) =$ 33.6 ساعة

$t_{1/2}(\beta^+) =$ 67.5 ساعة

4-7 وحدات النشاط الإشعاعي

Units of Radioactivity

تعرف كمية الإشعاعات المنطلقة من قِبَل أي مادة مشعة بنشاط تلك العينة A ، وهذا يساوي عدد حالات التحلل النووي أو التغيرات النووية في الثانية الواحدة في العينة التي تخضع للدرس . وتعرف وحدة النشاط (بيكوريل ، بك) بأنها تحلل نووي في الثانية (حسب نظام الوحدات العالمي) .

1بك (Bq) = 1 تحلل/ثانية .

أما الكوري (Ci) فيعرف بأنه عدد التحللات النووية في الثانية الناتجة عن غرام واحد من الراديوم . وقد وجد أنه يحدث في الغرام الواحد من الراديوم

3.7×10^{10} تحلل/ثانية ، أي أن الكوري = 3.7×10^{10} بك(Bq) .

فإذا أعطت أي كمية من عنصر مشع 3.7×10^{10} تحلل/ثانية ، قيل أن نشاط هـذه العينـة يسـاوي كـوري واحـد ويسـتخدم العلمـاء المليكـوري (mci) والميكروكوري (µci) في القياس أيضاً .

وهناك طريقة أخرى لقياس النشاط ، وهي ما يعرف بالنشاط النوعي ، وهـو يساوي عدد التحللات في الثانية الواحدة لكل غرام من العينة ، ووحدتـه بـك/غـم (Bq/gram) . وتسـمى كميـة الإشـعاعات الممتصـة مـن قبـل جسـم مـا في مسـار الإشعاع بالجرعة الممتصـة أو بالجرعـة Dose . وفي نظـام الوحـدات العـالمي تعـرف على أساس كمية الطاقة بالجول التي تمتص من قِبَل كل كغم من المـادة ، ويرمـز لهـا بالرمز Gy من Gray . وإذا امتص 1غـم مـن المـادة 100 إرج مـن الطاقـة سميـت الوحدة بالراد Rad .

Gy واحد = 1جول/كغم = 100 راد .

ولا تميز وحدة Gy بين تأثيرات الأنواع المختلفة من الإشعاعات في مـا يخص تلف الأنسجة الحيوانية .

فإشعاعات ألفا وبيتا وغاما لها درجات امتصاص مختلفـة مـن قبـل الأنسـجة ، ولهذا فإنها تخترق جسم الإنسان إلى أعماق مختلفة .

والوحدة التي تأخذ بعين الاعتبار نـوع الإشـعاع الممتـص مـن قبـل الأنسـجة الحيوانية هي وحدة الريم (rem) ، وللحصول على الجرعة الممتصـة بوحـدة الريـم تضرب الجرعة الممتصة بالراد بمعامل خاص يعتمد على نوع الإشعاع الممتص .

الأسئلة :

1- لدى مستشفى ما 1.5 كوري من ^{226}Ra على شكل $RaBr_2$ المـذاب في الماء ، فإذا كانوا يفصلون غاز ^{222}Rn كل 48 ساعة ، فاحسب ما يلي :

أ) نشاط ^{222}Rn في تلك اللحظة (بعد 48 ساعة) .

ب) حجم غاز ^{222}Rn في الظروف المعيارية بعد 48 ساعة .

2- احسب :

أ) كتلة 1كوري من ^{222}Rn .

ب) كتلة 1كوري من ^{32}P .

جـ) سرعة التحلل لـ 1سم^3 من غاز ^3_1H في الظروف المعيارية .

3- قام أحد العلماء بقياس النشاط الإشـعاعي لعينـة مـا علـى فـترات زمنيـة فحصل على ما يلي :

الزمن (ساعة)	النشاط (تحلل/دقيقة)
0.3	11100
5	5870
10	3240
15	2005
20	1440
30	1015
40	888
50	826
100	625

احسب نصف العمر لكل من المكونين ثم النشاط الإشعاعي لكل منهما عند الزمن صفر ، علماً بأن الإشعاع الخلفي هو 100376 تحلل في 1000 دقيقة وأن فعالية الكشف 17٪ .

4- وجد أن نشاط α الإشعاعي لمخلوط من نظائر الأستاتين At عند فترات زمنية هو :

الزمن (دقيقة)	النشاط (تحلل/دقيقة)
12	756
17.2	725
23.1	638
30.0	600
37.7	545
47.5	494
59.5	435
73	380
87	341
102	288
121	256
140	215.5
161	178.5
184	150.7
211	127.3
243	101.9

276	84.9
308	68.2
340	55.0

احسب فترة نصف العمر لكل من النظائر ونشاطها الإشعاعي عند الزمن صفر .

6- إذا افترضنا أن كمية ^{238}U تساوي كمية ^{235}U عند بداية الخلق ، وأن نسبة ^{238}U إلى ^{235}U هي 1:138 في وقتنا الحاضر . احسب العمر الزمني للخلق .

7- إذا كان النشاط النوعي للبوتاسيوم 1850 تحلل في الدقيقة/غم K وأن للبوتاسيوم نظير واحد مشع هو ^{40}K وأن نسبته في الطبيعة هي 0.0119٪ ، احسب نصف عمر ^{40}K .

8- عينة من ^{239}Pu النقي كتلتها 0.10 ملغرام ونشاطها 1.38×10^{7} تحلل في الدقيقة ، احسب نصف عمر ^{239}Pu . وإذا علمت أن ^{239}Pu يتكون من تحلل ^{239}Np ، فما هو عدد الكوري من ^{239}Np اللازمة لإنتاج 0.100 ملغرام ^{239}Pu .

9- تم تحضير 1.00×10^{-10} غرام من ^{210}Bi ، فإذا تركت هذه العينة بعد ذلك لمدة من الزمن بحيث وصلت كمية البنت ^{210}Po إلى أقصى كمية لها فاحسب ما يلي :

أ) t_{max} .

ب) نشاط ألفا الإشعاعي لـ ^{210}Po عند t_{max} .

جـ) نشاط بيتا الإشعاعي لـ ^{210}Bi عند t_{max} .

د) كتلة ^{210}Po وكميته بالكوري عند t_{max} .

10- تم قياس النشاط الإشعاعي لعينة نصف عمرها 7.5 دقيقة ما بين 10:03 و 10:13 فوجد أنه يساوي 34650 في العشر دقائق ، ما هو نشاط العينة بوحدة تحلل/دقيقة في الساعة 10:00 ؟ .

الفصل الخامس

تفاعلات الإشعاعات مع المادة

INTERACTION OF RADIATIONS WITH MATTER

5-1 مقدمة

وجد العلماء أن الطريقة الوحيدة للكشف عن الإشعاعات النووية هي من خلال تفاعلها مع المادة . وأنه لمن الصعب الكشف عن الإشعاع إذا كان تفاعله مع المادة قليلاً كالنيوترينو على سبيل المثال . ومن أجل أن نفهم طرق وأجهزة الكشف والقياس والتشخيص للإشعاعات النووية علينا أن ندرس تفاعل هذه الإشعاعات مع المادة .

ويساهم تباطء الإشعاع وامتصاصه في المادة في التقليل من طاقة الدقائق العالية وفي الكشف عن إشعاع معين من ضمن عدة إشعاعات لكل منهم خواص امتصاص خاصة به وفي استخدام الإشعاعات في الطب النووي .

اعتمد العلماء حتى عام 1950 على دراسة امتصاص الإشعاعات المنطلقة من مصادرها في تحديد طاقتها . وبعد ذلك استخدم الانحراف في المجال الكهربائي والمغناطيسي في تحديد الطاقة . تؤدي تفاعلات الإشعاعات جميعها مع المادة في نهاية الأمر إلى نفس النتيجة . وتضم المرحلة الأولى من التفاعل مع المادة ما يلي :

أ) تهيج الذرات والجزيئات .

ب) تأين الذرات والجزيئات .

ويعتمد هذا التأثير على نوع الإشعاع ، إن كان دقائق مشحونة أو إشعاعات كهرومغناطيسية أو نيوترونات . وتضم الدقائق المشحونة الإلكترونات والأيونات الموجبة الخفيفة ولكل منهما تفاعل خاص فيه وذلك بسبب الفرق الكبير في الكتلة بينهما . وسندرس كل منهما على حده .

5-2 الأيونات الموجبة Positive Ions

5-2-1 طرق فقدان الطاقة

Processes Responsible for Energy Loss

تخسر الأيونات الموجبة طاقتها بصفة رئيسية من تفاعلها مع الإلكترونات . ويؤدي هذا التفاعل إلى فصل الجزيئات أو إلى تهيجها أو إلى تأين الذرات والجزيئات . ونظراً لسهولة قياس التأين استخدم في عملية الكشف عن الأيونات الموجبة . وبما أن دقائق ألفا متوفرة من المصادر المشعة ركز العلماء في دراساتهم عليها .

يمكن لعدد من دقائق ألفا لهم طاقة ابتدائية معروفة أن يفقدوا كل الطاقة في حجرة التأين وذلك لأن دقائق ألفا تخترق المادة لمسافة قصيرة نسبياً فتنقص طاقتها إلى طاقة حرارية . ولهذا يمكن قياس التأين الكلي الناجم عن دقيقة ألفا . ولقد دلت التجارب على أن معدل الطاقة المستهلكة في تكوين زوج من الأيونات في الهواء يساوي 35 eV ، بينما الطاقة التي نحتاجها لتكوين زوج من الأيونات في الغازات الأخرى تتراوح من 21.9 eV في الزينون إلى 43 eV في الهيليوم . ويعكس هذا المدى الزيادة في طاقة التأين الأولى من 12.1 eV للزينون إلى 25.4 eV للهيليوم . وفي كل من الغازين يتساوى ذلك الجزء من الطاقة الكلية المستخدم في التأين . وتقلل درجات التحرر Degrees of freedom الموجودة في الجزيئات الغازية المكونة من ذرتين أو أكثر كمية الطاقة المستهلكة في التأين ، فعلى سبيل المثال نحتاج إلى 39 eV لتكوين زوج الأيونات في غاز الأمونيا NH_3 ، علماً بأن طاقة التأين الأولى له 10.8 eV . ونحتاج إلى طاقة أقل مما ذكر لتكوين زوج الأيونات في أشباه الموصلات كالجرمانيوم الذي نحتاج له 2.9 eV، علماً بأن الطاقة اللازمة لرفع إلكترون إلى حزمة التوصيل تساوي 1 eV . وتستخدم أشباه الموصلات في أجهزة الكشف عن الإشعاعات .

لا تعتمد الطاقة المستهلكة في تكوين زوج الأيونات على طاقة وطبيعة الإشعاع ، وقد ثبت هذا بالتجربة عند استخدام دقائق ألفا بطاقة تساوي عدة ملايين إلكترون ڤولت ، وبروتونات بطاقة 340 MeV ودقائق بيتا . ومن الطرق المستخدمة في قياس طاقة دقيقة مشحونة قياس عدد الأيونات الكلي كهربائياً الناتجة عن إيقافها في حجرة التأين المملوءة بالغاز أو في شبه موصل .

يذهب جزء كبير من طاقة الأيون الموجب على شكل طاقة حركية للإلكترونات المنطلقة من تأين الذرات أو الجزيئات نتيجة اصطدامها مع الأيون الموجب . وبالرجوع إلى قانون حفظ الزخم فإن أقصى سرعة للإلكترون المنطلق من اصطدام أيون موجب سرعته v مع المادة هي 2v . فعلى سبيل المثال إذا اصطدمت دقيقة α بطاقة 6 MeV نجم عن ذلك إلكترون بطاقة قصوى تساوي 3 KeV . وإن معدل الطاقة المنتقلة من الأيونات الموجبة للإلكترونات عند مرورها بالمادة يساوي 100-200 eV . وتسمى الإلكترونات المنطلقة من التأين بالإلكترونات الثانوية أو أشعة δ دلتا ، ولديها طاقة كافية لتأين ذرات أخرى . وفي الحقيقة هناك 60–80٪ من التأين الناجم من الأيونات الموجبة سببه التأين الثانوي Secondary Ionization وأن النسبة بين التأين الرئيسي إلى الثانوي غير معروفة بدقة .

إذا قلت سرعة الأيون إلى حد أصبحت منه قريبة من سرعة إلكترونات التكافؤ التابعة لذرات مادة التوقف بدءت ظاهرة جديدة تسمى بالتصادمات المرنة Elastic Collisions فيصطدم الأيون مع ذرات المادة بدل من أن يهيج إلكتروناتها . وتؤدي هذه التصادمات إلى ما يسمى بالإيقاف النووي Nuclear Stopping والذي يقارن بالإيقاف الإلكتروني Electronic Stopping السابق الذكر والذي يحدث على سرعات عالية . وإذا انخفضت سرعة الأيون وأصبحت قريبة من سرعة إلكتروناته الموجودة في مستوى الطاقة الرئيسي K بدأ هذا الأيون في التقاط الإلكترونات من ذرات مادة التوقف فتقل

شحنته من Z إلى Z-1 . وفي الغالب فإن الأيونات المارة عبر المادة تفقد إلكترونات الأفلاك التي لها سرعة في الفلك أقل من سرعة الأيون نفسه أي تتعرى .

ويمكن القول أن هناك ثلاث طرق يخسر فيها الأيون طاقته هي :

أ – إذا كانت سرعة الأيون عالية جداً فإنه يفقد جميع إلكتروناته ويخسر طاقته عبر التهييج الإلكتروني والتأين لمادة الإيقاف .

ب– وإذا بلغت سرعته سرعة الإلكترونات الموجودة في مستوى طاقته الرئيسي K بدأ الأيون بالتقاط الإلكترونات من مادة الإيقاف . ويستمر في خسارة طاقته إلكترونياً في الغالب .

جـ– وإذا وصلت سرعته من سرعة إلكترونات التكافؤ التابعة لذرات مادة الإيقاف بدأ يخسر طاقته من خلال التصادمات المرنة مع ذرات مادة الإيقاف بغض النظر إذا كان لا يزال يحتفظ بشحنة عليه أم لا .

ويمكننا القول أن ليس هناك تدرج واضح ما بين ب و جـ . وإن هناك اصطدامات مرنة وغير مرنة يقوم بها الأيون في منطقة ما من الطاقة .

5-2-2 المدى Range

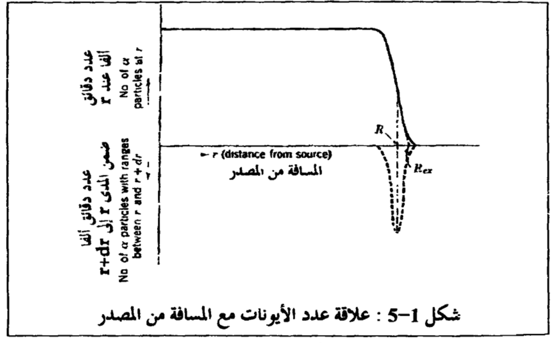
إذا قارنا كتلة الأيون الموجب مع كتلة الإلكترون وجدنا أن كتلته أضعافاً مضاعفة لكتلة الإلكترون . ولهذا فإن مسافة اختراق الأيونات الموجبة التي لها نفس النوع والطاقة الابتدائية متساوية في المادة تقريباً ، علماً بأن الأيون الموجب يصل إلى حالة السكون في نهاية المسافة . وتسمى هذه المسافة بالمدى ، ويعتمد المدى على نوع وطاقة الأيون . ويظهر تأثير الكتلة الكبيرة الحاسم في ما يلي :

1) صغر كمية الطاقة المفقودة في كل اصطدام (أقصى طاقة مفقودة تساوي

$\frac{4m}{M}$ من الطاقة الابتدائية ، حيث m كتلة الإلكترون و M كتلة الأيون الموجب).
فلهذا سيتعرض الأيون الموجب إلى عدد كبير جداً من الأصطدامات قبل أن يصل إلى السكون ، أي أن التذبذب في معدل الطاقة المفقودة في كل اصطدام قليل جداً.

2) انحراف الأيون الموجب عن مساره بعد كل اصطدام قليل جداً ، ولهذا فإن طول المسار الفعلي قريب جداً من مسار إسقاطه الأولي .

ونظراً للتذبذب في معدل الطاقة المفقودة ومسار الإسقاط ظهر ما يسمى بتفاوت المدى أو التفاوت Straggling علماً بأن نسبته قليلة .



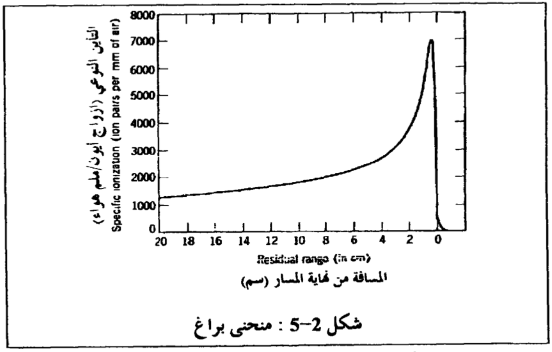
شكل 1–5 : علاقة عدد الأيونات مع المسافة من المصدر

تحدد طرق الامتصاص مدى الأيونات الموجبة ، وذلك إما من خلال ماص صلب أو غاز تحت ضغوط مختلفة . ويمثل الشكل (1–5) منحنى امتصاص محوره ص عبارة عن عدد الأيونات الموجودة في الغاز على مسافة r من المصدر وأما محور س فهو المسافة r من المصدر المطلق للأيونات الموجبة ذات الطاقة الواحدة . وينتجم الجزء المنقط في الشكل (1–5) عن تفاضل الجزء المكمل للمنحنى ويمثل هذا تفاوت المدى أو التفاوت .

ومتوسط المدى R_m (mean range) للأيونات هو المسافة r إلى قمة منحنى التفاضل وأما المسافة r والتي نحصل عليها من امتداد الجزء المستقيم من المنحنى المكمل وتقاطعه مع محور س فتسمى بالمدى المتد extrapolated range R_{ex} ويستخدم متوسط المدى في جداول المدى وفي العلاقات ما بين المدى والطاقة . ودرس العلماء العلاقة ما بين المدى الممتد ومتوسط المدى ، فهي تساوي 1.1٪ لدقائق ألفا ذات الطاقة العادية .

5-2-3 قدرة الإيقاف Stopping Power

تمثل العلاقة الرياضية dE/dx العلاقة بين طاقة الأيون الموجب ومداه . و dE/dx هي سرعة التناقص في الطاقة مع المسافة عبر المادة . وتسمى dE/dx أحياناً بقدرة الإيقاف أو التأين النوعي specific ionization ، وتعتمد dE/dx على طاقة وشحنة وكتلة الأيون .



شكل 2–5 : منحنى براغ

ويوضح الشكل (2–5) الصفات العامة لقدرة الإيقاف ويسمى المنحنى

بمنحنى براغ Bragg Curve ، ويمثل الشكل (5–2) العلاقة ما بين التأين النوعي والمسافة لدقيقة ألفا من نهاية المسار . ويبين هذا الشكل أن أقصى سرعة خسارة أو تناقص للطاقة يحدث عندما تكون طاقة الدقائق قليلة والعكس صحيح ، أي أن dE/dx تتناسب عكسياً مع طاقة الدقيقة .

ويفسر هذا على أساس أن التفاعل ما بين الدقائق المشحونة وإلكترونات الذرة هو من النوع الكولومبي الإلكتروستاتيكي الذي يحدث بين الشحنات الموجبة والسالبة . فإذا قلت شحنة الأيون نتيجة اقتناصه للإلكترونات خلال مروره في المادة فإن التفاعل (أو التجاذب) الكولومبي وسرعة تناقص الطاقة سوف يقلان . وهذا ما يحدث بالفعل عندما تكون طاقة الدقائق المشحونة قليلة وتكون ميكانيكية فقدان الطاقة عبر التصادمات المرنة مع ذرات المادة . وبالرجوع إلى (ب ، أ 1–2–4) نرى أن الأيون الموجب سوف يلتقط ويخسر الإلكترونات عدة مرات بالقرب من نهاية المسار .

وتقل سرعة تناقص الطاقة عندما تكون طاقة الدقيقة المشحونة عالية ويفسر هذا على أساس زمن التفاعل Time of interaction ما بين الدقيقة المشحونة والإلكترونات الذرية ، فإذا كانت سرعة الأيون v فإن الزمن الذي سيقضيه الأيون بالقرب من الذرة يتناسب مع $\frac{1}{v}$. وبما أن انتقال الزخم يتناسب أيضاً مع $\frac{1}{v}$ ، فإن انتقال الطاقة من الأيون إلى الإلكترون في الذرة يساوي النقص في طاقة الأيون ويتناسب طردياً مع مربع الزخم المنتقل . ولهذا كان لا بُد من أن يكون هناك مقداراً في سرعة خسارة الطاقة يتناسب عكسياً مع v^2 أو عكسياً مع E طاقة الدقيقة أو الأيون المشحون .

واشتق علماء كيمياء الكم والنسبية المعادلة التالية :

$$-\frac{dE}{dx}=\frac{4\pi\gamma^2 z^2 e^4 NZ}{mv^2}\left[\text{lin}\frac{2mv^2}{I}-\text{lin}(1-\beta^2)-\beta^2\right] \qquad (5\text{–}1)$$

حيث أن z العدد الذري للأيون و γ معامل التعري للأيون (معدل كسر الإلكترونات التي تم تعريتها من الأيون) و e شحنة الإلكترون و N عدد الذرات في وحدة الحجم لمادة الإيقاف و Z العدد الذري لمادة الإيقاف و m كتلة الإلكترون و v سرعة الأيون و I طاقة تأين الإلكترون في مادة الإيقاف. و $\beta = \frac{v}{c}$ و c سرعة الضوء.

وفي حال كانت طاقة الأيونات الحركية أقل من طاقة كتلتها الساكنة فإن قيمة $\beta<<1$ وتختصر المعادلة (5−1) لتصبح كالآتي :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi\gamma^2 z^2 e^4 NZ}{mv^2} \text{lin} \frac{2mv^2}{I} \qquad (5-2)$$

وهذا يعني تناقص قدرة الإيقاف عندما تزداد سرعة الأيون .

وفي حال أصبحت طاقة الأيون الحركية أعلى من طاقة كتلته الساكنة اقتربت قيمة β من 1 . وأما المقدار $\text{lin}(1-\beta^2)$ في المعادلة (5−1) فيتغير بسرعة ولهذا فإن قدرة الإيقاف تزداد مع ازدياد الطاقة . وأقل قيمة لها عندما تساوي الطاقة الحركية ضعف طاقة الكتلة الساكنة للأيون ، فهي في الكربون $1.8\ MeVg^{-1}\ cm^2$ وفي الرصاص $1.1\ MeVg^{-1}\ cm^2$.

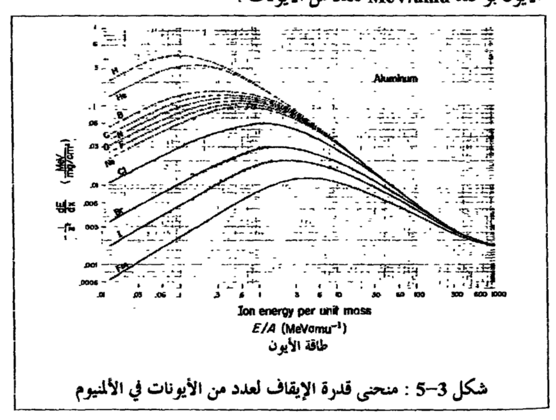
5-2-4 قدرة الإيقاف لأيونات مختلفة في مواد مختلفة

Stopping Power for Different Ions in Different Materials

جاءت المعادلة (5−1) بالحقيقة المهمة التالية : قيمة $-\frac{dE}{dx}$ لكل الأيونات المشحونة والتي لها نفس السرعة في مادة الإيقاف تتناسب طردياً مع مربع شحنتها. أي أن $-\frac{dE}{dx}$ لبروتون $^1_1P^+$ طاقته E ولديوترون $^2_1D^+$ طاقته 2E ولترتيون $^3_1T^+$ طاقته 3E متساوية وتساوي $\frac{1}{4}$ (رُبع) $-\frac{dE}{dx}$ لأيون هيليوم $^3_2He^{2+}$ طاقته 3E ولدقيقة ألفا

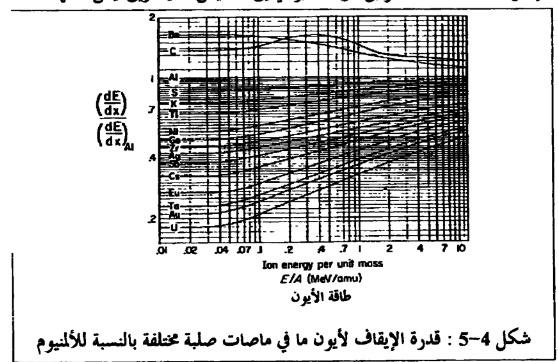
$^4_2He^{2+}$ طاقتها 4E . والشرطان الأساسيان لحدوث ما سبق أن يتعرى أو يفقد الأيون جميع إلكتروناته ، أي أن قيمة γ = 1 ، وأن لا يفقد طاقته عبر الاصطدامات المرنة أي الإيقاف النووي . وقد لوحظ أن الأيونات الخفيفة كالهيدروجين والهيليوم تتعرى من جميع إلكتروناتها إذا بلغت طاقتها 1 MeV/amu (amu وحدة الكتلة الذرية) . بينما الأيونات الأثقل قليلاً من البورون إلى النيون فتتعرى عند 10 MeV/amu . وفي حال اليورانيوم تصل إلى عدة مئات من MeV/amu .

ويبين الشكل (3–5) ما يعقب ذلك من التقاط إلكترونات ومن الإيقاف النووي كلما قلت طاقة الأيون . ويمثل محور ص في الشكل (3–5) لوغاريتم قدرة الإيقاف في الألمنيوم مقسومة على مربع العدد الذري للأيون ويمثل محور س طاقة الأيون بوحدة MeV/amu لعدد من الأيونات .



شكل 3–5 : منحنى قدرة الإيقاف لعدد من الأيونات في الألمنيوم

ونرى من الشكل (5–3) والمعادلة (5–2) أن سرعة فقدان الطاقة $-\frac{dE}{dx}$ لأيونات مختلفة لها نفس الطاقة غير متساوية . فعلى سبيل المثال إذا كان هناك الأيونات التالية ^{14}N و ^{15}O و ^{16}O ولكل منها طاقة 80 MeV فإن $-\frac{dE}{dx}$ لها في الألمنيوم 3.46 و 3.32 و 2.49 $MeVmg^{-1}\ cm^{2}$. تعطي المعادلتان (5–1) و (5–2) قدرة الإيقاف $-\frac{dE}{dx}$ بوحدة $MeVmg^{-1}\ cm^{2}$ ، وإذا أردنا تحويلها إلى الوحدة erg/cm وجب علينا قسمتها على $1.6\times10^{-6}\ ergMeV^{-1}$ وعلى كثافة مادة الإيقاف بوحدة $mg\ cm^{-3}$. وتستخدم خاصية قدرة الإيقاف في التعرف على الأيونات التي لها عدد ذري لا يزيد عن 25 وعلى نظائر الأيونات التي لها عدد ذري يقل عن 21 وذلك من خلال الجهاز المسمى بالتلسكوب المشخص للدقائق Particle-identifier telescope . وطريقة عمل هذا الجهاز فهي كالآتي: تمر الدقيقة أولاً عبر كاشف رقيق حيث تفقد جزء من طاقتها ومن ثم عبر كاشف سميك حيث تفقد كل طاقتها . وتحدد طاقة الدقيقة من مجموع الإشارتين و $-\frac{dE}{dx}$ من الإشارة الخاصة بالكاشف الرقيق . وهذا سيؤدي إلى تشخيص الدقيقة وإلى قياس طاقتها .



شكل 4–5 : قدرة الإيقاف لأيون ما في ماصات صلبة مختلفة بالنسبة للألمنيوم

يبين الشكل (5–4) قدرة الإيقاف لأيون ما في مواد ماصة صلبة مختلفة نسبة للألنيوم . ويستخدم هذا الشكل مع الشكل (5–3) في تحديد قدرة الإيقاف لأيونات متعددة في مواد ماصة صلبة مختلفة . ومثال على ذلك قدرة الإيقاف لأيون ^{12}C طاقته 120 MeV في النيكل تساوي $1.0\ MeVmg^{-1}cm^{2}$ ، وهذه القيمة قد حسبت كالآتي :

أ) قدرة الإيقاف لأيون ^{12}C طاقته 120 MeV في الألمنيوم من الشكل (3–5) تساوي $1.2\ MeVmg^{-1}cm^{2}$ ، كما يلي :

$E/A = 120/12 = 10\ MeV/amu$ وبالمقابل فإن $-\frac{1}{Z^2}\frac{dE}{dx} = 0.033$

وقدرة الإيقاف $-\frac{dE}{dx} = (6)^2 \times 0.033 = 1.2\ MeVmg^{-1}cm^{2}$.

ب) قدرة الإيقاف لأيون طاقته 10 MeV/amu في النيكل نسبة للألمنيوم من الشكل (5–4) هي 0.84 .

أي أن

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Ni}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Al}} = 0.84$$

وبالتعويض من (أ) بقيمة $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Al}$ فإن :

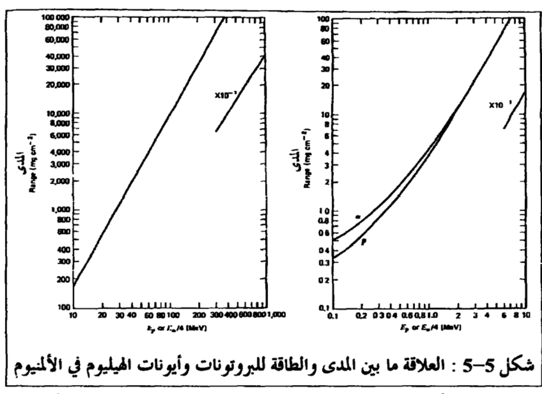
$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Ni} = 0.84 \times 1.2\ MeVmg^{-1}cm^{2} = 1.0\ MeVmg^{-1}cm^{2}$$

5-2-5 العلاقات ما بين الطاقة والمدى

Range-Energy Relations

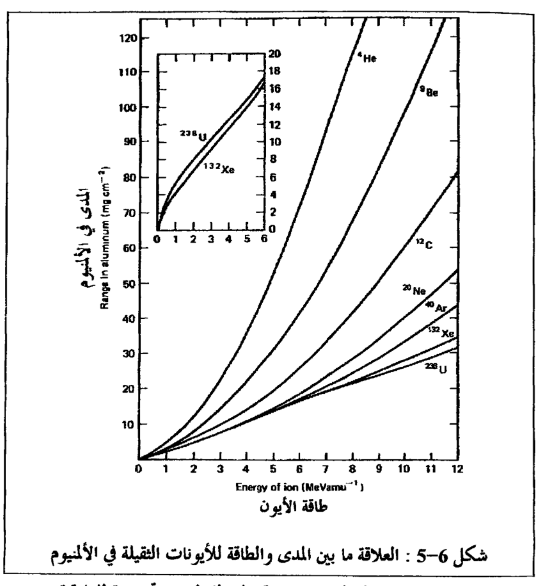
يمكننا أن نحسب المدى لأي أيون من تكامل مصطلح أو مقدار الطاقة المفقودة :

$$R = \int_{E_0}^{0} \frac{1}{dE/dx} dE \qquad (5\text{–}3)$$



شكل 5–5 : العلاقة ما بين المدى والطاقة للبروتونات وأيونات الهيليوم في الألمنيوم

يمثل الشكل (5–5) العلاقــة بـين المـدى للبروتونـات ولدقـائق ألفـا (أيونـات الهيليـوم) في الألمنيـوم والطاقـة الحركيـة لكـل منهمـا . بينـت هـذه المنحنيـات علـى الحسابات النظرية وليست العملية وذلك لأنها أدق . ولقد استخدمت المعادلة (1–5) في الحسابات النظرية لتغطية ذلك المدى من الطاقة ، وذلك لظهور طرق أخـرى لخسارة الطاقة عندما تكون طاقة الأيـون عاليـة جـداً ، فعلـى سـبيل المثـال : تخسـر البروتونات ذات 2GeV 15٪ من طاقتها نتيجة للتفـاعلات النوويـة في مـاص مـن الرصاص سمكه 2.5سـم وحـوالي 3٪ نتيجـة لتفـاعلات التـأين في الرصـاص . وأمـا الشكل (6–5) فيبين علاقة المدى مع الطاقة لعدد من الأيونـات الأخـرى . أمـا إذا استخدمنا المعادلـة (2–5) في المعادلـة (3–5) لحســاب المــدى وأهملنــا المقــدار $\text{lin}\frac{2mv^2}{I}$ ، نجد أن المدى للدقيقة يتناسب طردياً مع مربع طاقتها غير النسبية .



شكل 6–5 : العلاقة ما بين المدى والطاقة للأيونات الثقيلة في الألمنيوم

وبناء على هذا حاول العلماء اشتقاق المعادلة الشبه تجريبية للعلاقة ما بين الطاقة والمدى التالية :

$$R = aE_0^b \qquad (5\text{–}4)$$

وتحسب قيم الثوابت a و b عملياً وذلك لأنها تتغير تغيراً طفيفاً مع الطاقة .

أما E_0 فهي الطاقة الحركية للأيون الموجب .

تعتمد قيم a و b على نوع الدقيقة ، وتتراوح قيم b من 1.7 إلى 1.8

للأيونات التي تتعرى تماماً من إلكتروناتها طوال المدى . أما الأيونات الناجمة عن الانشطار والتي لها $\gamma<1$ ، فإن مداها يزداد قليلاً مع الطاقة ، وذلك لأن زيادة الطاقة سيؤدي إلى زيادة معدل الشحنة على الأيون ، ولهذا فإن قيمة b تساوي 0.5 ومداها يتناسب طردياً مع سرعتها . تستخدم المعادلة (4–5) في الاستكمال الداخلي interpolation والاستكمال الخارجي extrapolation لجداول المدى .

وبما أن قدرة الإيقاف الإلكتروني لكل الأيونات التي تسير بنفس السرعة تتناسب طردياً مع مربع شحنة الأيون استطعنا أن نعبر عن المدى لأيون ما نسبة لأيون آخر بطريقة بسيطة ، على شرط أن يقضيا كل وقتهم في مادة الإيقاف (المدى) متعريين من الإلكترونات ، من خلال المعادلة التالية :

$$R(Z_1,M_1,E_1) = \frac{M_1 Z_2^2}{M_2 Z_1^2} R\left(Z_2,M_2,\frac{M_2}{M_1}E_1\right) \qquad (5\text{–}6)$$

حيث أن E_1 , M_1 , Z_1 عبارة عن العدد الذري والكتلة والطاقة لذلك الأيون. فعلى سبيل المثال : ما هو المدى لأيون ^{16}O طاقته 160 MeV . في الألمنيوم؟ للإجابة على هذا نجد من الشكل (5–5) أن المدى لبروتون طاقته 10 MeV هو $171\ mg\ cm^{-2}$ ، وبالتعويض في المعادلة (6–5) نحصل على ما يلي :

$$R(8\ ,16\ ,160) = \left(\frac{16\times 1^2}{1\times 8^2}\right) R(1\ ,1\ ,\frac{1}{16}.160)$$

$$= \left(\frac{16}{64}\right) 171 = 43\ mg\ cm^{-2}$$

وإذا قارنا هذه القيمة المحسوبة مع تلك المقاسة $46.8\ mg\ cm^{-2}$ نقول أن المدى الفعلي أكبر قليلاً وذلك لأن اقتناص الإلكترونات يقلل من سرعة فقدان الطاقة ، والخطأ في القيمة المحسوبة ناجم عن ذلك الجزء من المدى الذي لا يكون فيه الأيون متأيناً تماماً .

تتكون مادة الإيقاف من عنصر أو أكثر . وفي حال كان هناك مركب أو مخلوط من العناصر مثل الهواء على سبيل المثال ، فإن قدرة الإيقاف الكلية هي مجموع قدرة الإيقاف لكل من المكونات . ونعبر عن هذا بالمعادلة التالية :

$$\frac{1}{R_t}=\frac{W_1}{R_1}+\frac{W_2}{R_2}+\frac{W_3}{R_3}+.......... \qquad (5\text{–}7)$$

حيث أن R_1 , R_2 , R_3 , ... قيم المدى بوحدة mg/cm^2 لذلك الأيون في كل من المكونات 1 و 2 و 3 ... و R_t هو مدى ذلك الأيون في المركب أو المخلوط المتجانس من العناصر المختلفة كل حسب كسر وزنه W_1 , W_2 , W_3 .

ولا تستخدم المعادلة (7–5) للمخاليط غير المتجانسة .

5-2-6 التفاوت Straggling

وجد العلماء أن هناك تذبذب في كمية الطاقة المفقودة في كل اصطدام وفي عدد الاصطدامات التي تحدث في وحدة المسار الطولية . ويزداد التذبذب في الطاقة المفقودة في كل اصطدام كلما قلت طاقة الأيون والتي يصاحبها تذبذب في شحنة الأيون إلى أن تقل الطاقة ويصبح الإيقاف النووي المهيمن .

ونتيجة للإيقاف النووي يحدث تشتت في مسار الأيون بما يعني أن مسار الحركة الفعلي للأيون أقل من المسار القطعي المتوقع . ونتيجة لهذه التأثيرات فإنه لن يكون هناك مدى وحيداً لدقائق حزمة من الأيونات لها نفس الطاقة في ماص ما. أي أن هناك انتشاراً في المدى أو ما يسمى بالتفاوت في المدى .

ويعرف التفاوت S كمياً على أنه الفرق بين متوسط المدى والمدى الممتد (شكل 1–5) . فعلى سبيل المثال فإن التفاوت لبروتونات تسير في الهواء يتراوح من 1.9 إلى 1.1٪ من متوسط المدى إذا تراوحت الطاقة الأولية من 8 إلى 500 MeV،

وتقل نسبة التفاوت بحوالي 0.3 كلما ازدادت طاقة الأيون أربع أضعـاف . ويمكننـا أن نحسب التفاوت لأي دقيقة لها شحنة Z وكتلة M بالرجوع إلى تفاوت البروتون الذي له نفس السرعة الأولية وطاقته عالية بحيث تكون شحنته 1+ في معظم المـدى وذلك باستخدام المعادلة (5-8) التالية :

$$S_{Z,M} = \frac{\sqrt{M}}{Z^2} S_{1,1} \qquad (5-8)$$

ويستفاد من هذه المعادلة في حساب التفاوت لدقائق ألفا التي لهـا 40 MeV ولكنها لا تصلح لنواتج الانشطار .

5-3 الإلكترونات Electrons

5-3-1 طرق فقدان الطاقة

Processes Responsible for Energy Loss

تتفاعل الإلكترونات مع المادة بطريقة مشابهة للأيونـات الموجبـة . كمـا يتـم فقدان الطاقة بنفس الطريقة في كلا الحالتين . وإن معدل الطاقة المسـتهلكة المفقـودة في تكوين زوج من الأيونات في الهواء يساوي 35 eV وهـي نفـس القيمـة في حـال الأيونـات الموجبـة (1-2-4) . ويقـدر التـأين الرئيسـي النـاجم عـن التـأين بالإلكترونات بحوالي 20-30٪ من التأين الكلي ، أي أن التأين الثانوي يشـكل مـا نسبته 80-70٪ من التأين الكلي .

وجد العلماء أن هناك بعض الاختلافات بين تفاعلات الإلكترونات والأيونات الموجبـة مع المادة . أولها سرعة الإلكترون التي تفوق بكميـة كبـيرة سـرعة الأيـون الموجـب ولهـذا فإن التأين النوعي للإلكترون أقـل بكثير . ويبـين الجـدول (5-1) التـأين النوعـي للإلكترونـات في الهواء عند قيم طاقة متعددة . ويلاحظ من الجـدول السـابق أن أعلـى قيمـة تـأين نوعـي 5950

زوج من الأيونات لكل ملغرام لكل سنتيمتر مربع تحدث عندما تكـون طاقة الإلكـترون 146 eV وسرعته 0.024 C (C سرعة الضوء) . وهذه السرعة أعلى من سرعة دقائق ألفا عند قمة منحنى براغ . ويتوقف التأين في الهواء إذا وصلت طاقة الإلكترون إلى 12.5 eV (طاقـة التأين الأولى لجزيء الأوكسجين) . ثم تصل كمية التأين النوعي إلى أقل قيمة لها عندمـا تصـل طاقة الإلكترون إلى 1.4 MeV . وإذا ازدادت الطاقة عـن ذلـك فسـرت الزيـادة في التـأين النوعـي على أساس التأثير النسبي المستمد من المعادلة (1–5) .

السرعة Velocity (in Units of the Velocity of Light, c)	الطاقة Energy (MeV)	أزواج الأيونات Ion Pairs per 1.00 mg cm^{-2}
0.001979	10^{-6}	0
0.006257	10^{-5}	0
0.0240	1.46×10^{-4}	5950 (maximum)
0.1950	10^{-2}	~850
0.4127	0.05	154
0.5483	0.10	116
0.8629	0.50	50
0.9068	0.70	47
0.9411	1.0	46
0.9791	2.0	46
0.9893	3.0	47
0.9934	4.0	48
0.9957	5.0	49
0.9988	10	53
0.99969	20	57
0.999949	50	63
0.9999871	100	66

جدول 1–5 : التأين النوعي للإلكترونات ذات الطاقة المختلفة في الهواء .

قد يخسر الإلكترون كل طاقته في اصدام واحد ولهذا فإن التفاوت في المدى أعلى من الأيونات الموجبة ولا تعطي المعادلة الرياضية الوصف الحقيقي لعملية فقدان الطاقة . فإذا مرت حزمة متجانسة من الإلكترونات في المادة ازداد التفاوت نتيجة لتشتت الإلكترونات في جميع الاتجاهات مما سيؤدي إلى وجود أطوال مختلفة للمدى في مادة الامتصاص . وينتج الانحراف الزاوي الكبير للإلكترونات عن التشتت النووي على الرغم من أن فقدان الطاقة ناجم عن التفاعل مع الإلكترونات.

تفقد الإلكترونات ذات الطاقة العالية طاقتها بطريقة أخرى أيضاً وتسمى هذه الطريقة بإطلاق الإشعاع (برمز إشتر آلونج **bremsstrahlung**) ، وتحدث عندما يتسارع الإلكترون في المجال الكهربائي للنواة . وتقدر نسبة فقدان الطاقة بهذه الطريقة إلى تلك التي تتم بالتأين في عنصر ما عدده الذري Z بالمقدار التالي $\frac{EZ}{800}$ ، و E هي طاقة الإلكترون بوحدة المليون إلكترون ڤولت . وهذا يعني أن فقدان الطاقة بهذه الطريقة يصبح محسوساً في $_{82}Pb$ الرصاص عند $1\ MeV = E$ وغير مهم في المواد الخفيفة كالهواء والألمنيوم عندما تكون طاقة الإلكترون تساوي طاقة بيتا . وتعرف المسافة التي تنقص من خلالها طاقة الإلكترون بمقدار e بطول الإشعاع (**Radiation Length**) .

وبما أن دقائق بيتا تنطلق بطيف من الطاقة المستمر فإن أي محاولة لتحليل امتصاصها في المادة فاشلة وذلك للتفاوت الكبير في المدى .

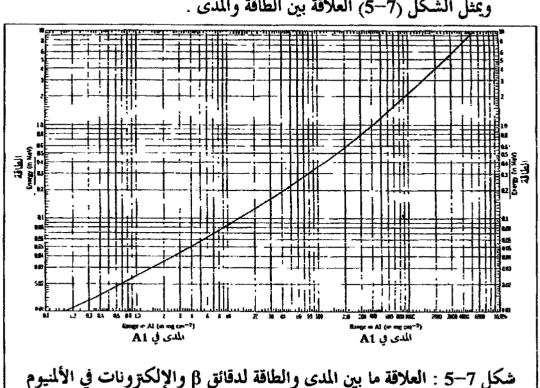
5-3-2 امتصاص دقائق بيتا

Absorption of Beta Particles

يؤثر الطيف المستمر والتشتت لدقائق بيتا على امتصاصها مما يؤدي إلى أن هناك قانون أسي لامتصاص دقائق بيتا ذات الطاقة القصوى ، ولهذا ترسم منحنيات الامتصاص (النشاط ضد السمك للماص) على ورق نصف لوغارتمي . ويعتمد

شكل منحنى الامتصاص على شكل طيف أشعة بيتا وعلى تأثير تشتتها وعلى الترتيب الهندسي للعينة المشعة والماص والكاشف فعلى سبيل المثال إذا كانت العينة والماص قريبين جداً من الكاشف ظهر منحنى الامتصاص وكأنه خط مستقيم وإذا كانت دقائق بيتا نابعة عن طيفين مختلفين في الطاقة القصوى لذلك المصدر المشع فإن ميل المنحنى سيتغير ، وهذا يشبه إلى شكل كبير منحنى التحلل النصف لوغارتمي لعينة تحتوي على مصدرين مشعين مختلفين في نصف العمر . وإذا عُرف المدى لدقائق بيتا وللإلكترونات التحول تمكنا من وضع علاقة بين المدى والطاقة يستفاد منها في معرفة الطاقة القصوى .

ويمثل الشكل (7–5) العلاقة بين الطاقة والمدى .



شكل 7–5 : العلاقة ما بين المدى والطاقة لدقائق β والإلكترونات في الألمنيوم

5-3-3 التشتت المرتد Back Scattering

تلاحظ ظاهرة تشتت الإلكترونات بواسطة النواة والإلكترونات بشكل كبير وواضح أكثر من تشتت الدقائق الثقيلة . ينعكس أو يرتد جزء من الإلكترونات المصطدمة بمادة الماص نتيجة تشتت واحد أو تشتتات متعددة . وتزداد شدة الإلكترونات المرتدة كلما ازداد سمك العاكس إلى أن يصل السمك إلى أكثر من ثلث المدى للإلكترونات وتسمى هذه الحالة بالإشباع . وتسمى النسبة ما بين النشاط الإشعاعي لمصدر يطلق بيتا بوجود عاكس إلى تلك في عدم وجوده بمعامل التشتت المرتد . ولا يعتمد معامل التشتت المرتد عند الإشباع على طاقة بيتا القصوى إذا تعدت 0.6 MeV ويتراوح المعامل من 1.3 للألمنيوم إلى 1.8 للرصاص. وتعتمد هذه المعاملات على الترتيب الهندسي لعملية العد للدقائق اعتماداً مباشراً ، تتغير بتغيره . ويمكن أن نجد أيضاً اختلافاً في التشتت المرتد للبوزترونات والنيغاترونات عند نفس الطاقة .

5-4 الإشعاع الكهرمغناطيسي

Electromagnetic Radiation

أشعة جاما وإكس Gamma and X-ray

5-4-1 طرق فقدان الطاقة

Processes Responsible for Energy Loss

إذا مرت الفوتونات في المادة فإنها لا تخسر طاقتها بشكل مستمر في مسارها كما يحدث للدقائق المشحونة . فهناك طريقتين من ثلاثة طرق تتم فيها خسارة طاقة الفوتون الكاملة وانتقالها إلى مادة الماص من خلال تفاعل واحد . ولهذا فإن امتصاص الفوتونات في المادة يتبع النمط الأسي ونصف السمك للفوتونات أكبر من المدى

لدقائق بيتا التي لها نفس الطاقة . وبناء على ما سبق فإن معدل التأين النوعي لأشعة جاما يساوي 0.1 إلى 0.001 من التأين النوعي لإلكترونات لها نفس الطاقة وإن المدى الحقيقي أكبر بكثير . وأما التأين الملاحظ في أشعة جاما فطبيعته في الغالب ثانوية . ومعدل الطاقة المستهلكة المفقودة في تكوين زوج من الأيونات في الهواء يساوي 35 eV وهي نفس القيمة في حال دقائق بيتا والأيونات الموجبة (1–3–4) .

5-4-2 الأثر الكهرضوئي Photoelectric Effect

إذا كانت طاقة الإشعاع الكهرمغناطيسي قليلة ، فإن أهم طريقة هي الأثر الكهرضوئي . والذي تنتقل فيه طاقة الإشعاع الكهرمغناطيسي hν إلى إلكترون مرتبط في الذرة أو الجزيء وينتج عن ذلك انطلاق الإلكترون بطاقة حركية تساوي $\in b$ - hν ، و $\in b$ هي طاقة ربط الإلكترون ، أي أن الإشعاع الكهرمغناطيسي يختفي تماماً ، كما يحافظ على الزخم في حال اكتسبت الذرة أو الجزيء المتبقي بعض الزخم . فإذا كانت طاقة الفوتون أعلى من طاقة الربط لإلكترونات مستوى K الرئيسي في الماص ، حدث الأثر الكهرضوئي في المستوى K بشكل كبير أو رئيسي وفي المستوى الرئيسي L بحدود 20٪ وتقل النسبة في المستويات الخارجية . ولهذا السبب فإن احتمالية الامتصاص الكهرضوئي تتوقف تماماً عندما تساوي قيم طاقة جاما أو إكس طاقة ربط الإلكترونات في المستويات الرئيسية K , L , M , ... إلخ .

فإذا كانت طاقة الفوتون أعلى من طاقة الربط للمستوى K في الماص فإن الامتصاص الكهرضوئي يقل بسرعة كبيرة (تقريباً مع $E\gamma^{-7/2}$) ، ومن ثم ببطء (تقريباً مع $E\gamma^{-1}$) كلما ازدادت طاقة الفوتون . ويتناسب الامتصاص الكهرضوئي طردياً مع Z^5 . وتصل نسبة الامتصاص الكهرضوئي إلى الامتصاص الكلي 5٪

عندما تساوي طاقة جاما 0.15 MeV في الألمنيوم و 0.40 MeV في النحاس و 1.2 MeV في القصدير و 4.7 MeV في الرصاص . وليس للامتصاص الكهرضوئي أهمية تذكر في العناصر الثقيلة وذلك إذا كانت قيم الطاقة أكثر من 1 MeV .

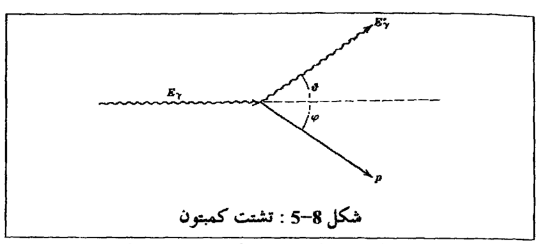
ويعزى التأين الناجم عن الإلكترونات الضوئية إلى الفوتونات ذات الطاقة القليلة والأثر التأيني الناجم عنها . ولهذا يستخدم الأثر الكهرضوئي في تحديد طاقة أشعة جاما وذلك من خلال قياس التأين الكلي الناتج عن الإلكترونات الضوئية بواسطة عدادات الوميض أو أشباه الموصلات .

5-4-3 أثر كمبتون Compton effect

يختلف هذا الأثر عن الأثر الكهرضوئي في أن جزء من طاقة الفوتون وليس كلها تنتقل إلى إلكترون مرتبط أو حُر غير مرتبط . وينتج عن ذلك نقصان في طاقة الفوتون وانحراف عن مساره الأصلي . ولهذا سماه بعض العلماء بتشتت كمبتون Compton Scattering . ومن ثم اشتقوا العلاقة الرياضية بين زاوية التشتت والطاقة المفقودة من الظروف النسبية في المحافظة على الزخم والطاقة . ويربط التعبير النسبي التالي العلاقة ما بين الطاقة الكلية E للدقيقة وزخمها .

$$E = \left(E_0^2 + C^2P^2\right)^{1/2} \qquad (5-9)$$

حيث أن E_0 الطاقة الكلية للدقيقة في حالة السكون وتساوي mC^2 و m هي كتلة الدقيقة في حالة السكون . كما علينا أن نتذكر أن الكتلة الساكنة للفوتون تساوي صفراً . ويمثل الشكل (5-8) ما يحدث من تشتت وفقدان في الطاقة .



شكل 8-5 : تشتت كمبتون

وتعرف E_γ على أنها طاقة أشعة جاما الأولية و E_γ^- على أنها طاقة جاما بعد الانحراف بزاوية θ و E_0 على أنها طاقة الإلكترون الساكن (511 KeV) و P على أنه زخم الإلكترون المنطلق بزاوية φ بالنسبة للمسار الأصلي لجاما .

وإن معاملات الظروف النسبية في المحافظة على الزخم والطاقة الموازية والمتعامدة مع مسار السقوط لجاما هي :

$$E_\gamma + E_0 = E_\gamma^- + \left(E_0^2 + C^2P^2\right)^{1/2} \qquad (5-10)$$

$$\frac{E_\gamma}{C} = \frac{E_\gamma^-}{C}\cos\theta + p\cos\varphi \qquad (5-11)$$

$$\frac{E_\gamma^-}{C}\sin\theta = p\sin\varphi \qquad (5-12)$$

وإذا ربعنا المعادلتين (5-11) و (5-12) وعوضنا بالعلاقة $1 = \sin^2\varphi + \cos^2\varphi$ حصلنا على ما يلي :

$$E_\gamma^2 - 2E_\gamma E_\gamma^- \cos\theta + \left(E_\gamma^-\right)^2 = C^2P^2 \qquad (5-13)$$

وإذا عوضنا المعادلة (5-13) في المعادلة (5-10) نتجت المعادلة (5-14) .

$$\frac{1}{E_\gamma^-} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{1-\cos\theta}{E_0} \qquad (5-14)$$

وبالتعويض عن E بالقيمة $\frac{hc}{\lambda}$ نحصل على ما يلي :

$$\lambda^{-} - \lambda = \frac{h}{m_e C}(1\text{-}\cos\theta) \quad (5\text{–}15)$$

حيث أن m_e هي كتلة الإلكترون الساكن .

وتسمى $\frac{h}{m_e C} = 2.42631\times10^{-10}$سم بطول موجة كمبتون لذلك الإلكترون.

تبين معادلة (5–15) للطاقة الساقطة وجود حد أدنى لطاقة (حد أقصى لطول موجة) أشعة جاما المتشتتة وهذا يحدث عندما تشتت في الاتجاه المعاكس $\cos\theta = -1$. ويحسب الحد الأدنى للطاقة مباشرة من المعادلة التالية :

$$\left(E_{\gamma}^{-}\right)_{س} = \frac{E_0}{2}\left(\frac{1}{1+E_0/2E_{\gamma}}\right) \quad (5\text{–}16)$$

وإذا كانت طاقة أشعة جاما الساقطة $E_{\gamma} >> \frac{1}{2}E_0$ فإن الحد الأدنى لطاقة أشعة جاما المتشتتة يساوي $\frac{1}{2}E_0 = 250$ KeV . ولهذا يبين طيف الوميض لأشعة جاما ذات الطاقة العالية قمة تسمى قمة التشتت المرتد back-scattering peak عند طاقة ≤ 250 KeV وتنجم هذه القمة عن تشتت كمبتون في المواد المحيطة . ويبين الطيف وجود منخفض بين القمة الضوئية وطيف كمبتون المتصل ويساوي عرض هذا المنخفض الحد الأدنى لطاقة (≤ 250 KeV) أشعة جاما المتشتتة في البلورة . لا يعتمد تشتت كمبتون لكل إلكترون على العدد الذري Z ولهذا فإن معامل التشتت لكل ذرة يتناسب طردياً مع العدد الذري Z ، وفي حال تعدت الطاقة 0.5 MeV فإنه يتناسب طردياً مع E_{γ}^{-1} . أي أن هناك نقص تدريجي لتشتت كمبتون مع الزيادة في الطاقة وذلك إذا قورن مع الامتصاص الكهرضوئي وخاصة في مدى الطاقة الذي يصل إلى 1 أو 2 MeV ، ويسيطر تشتت كمبتون في الرصاص في مدى الطاقة من 0.6 إلى 4 MeV .

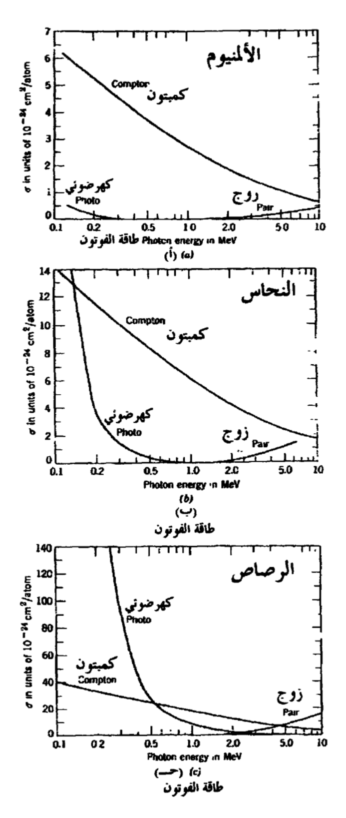
5-4-5 إنتاج الزوج Pair Production

يعرف إنتاج الزوج على أنه إنتاج لزوج من الإلكترون والبزوترون وينظر إلى عملية إنتاج الأزواج على أنها الآلية الثالثة التي يمتص فيها الإشعاع الكهرمغناطيسي . لا يمكن أن تنتج الأزواج إذا كانت طاقة 1.02 MeV > E_γ . وإذا تعدت E_γ هذه القيمة ازدادت احتمالية حدوث إنتاج الأزواج ببطء مع الزيادة في الطاقة إلى أن تصل E_γ إلى حوالي 4 MeV، عند ذلك تصبح العلاقة طردية مع $\log E_\gamma$. وتتناسب الاحتمالية طردياً مع Z^2 . ويعتبر إنتاج الأزواج الآلية المسيطرة عند قيم الطاقة العالية . وتحدد طاقة أشعة جاما من خلال قياس الطاقة الكلية لأزواج الإلكترون – البزوترون . ويتبع إنتاج الأزواج عملية تسمى بإبادة البزوترون **Positron Annihilation** يبيد فيها الإلكترون السالب البزوترون الموجب وينطلق عن ذلك فوتونات لكل منهما طاقة تساوي **0.51 MeV** . ويستدل على إنتاج الأزواج من خلال طيف الأشعة الصادر عن الفوتونين عند **0.51 MeV** .

5-4-6 الطاقة وتبعية العدد الذري

Energy and Z Dependence

وجد العلماء أن المقاطع المستعرضة الذرية الثلاثة والخاصة بطرق فقدان الطاقة الثلاث السابقة الذكر تزداد مع الزيادة في العدد الذري ويشذ عن هذا الأثر الكهرضوئي في حال كانت طاقة الأشعة الكهرمغناطيسية قليلة جداً . ولهذا فإن للعناصر الثقيلة فاعلية أكبر في امتصاص الأشعة الكهرمغناطيسية بالمقارنة مع العناصر الخفيفة ، وأكثر العناصر استخداماً هو الرصاص ويتمتع الرصاص بقدرة عالية على امتصاص الأشعة الكهرمغناطيسية ، كما أنه رخيص الثمن وسهل التشكيل . وإذا أمعنا النظر في الرسومات الثلاث الموجودة في الشكل (5–9) تبين لنا أن هنالك نقصاناً لأثر كمبتون وللأثر الكهرضوئي وزيادة في إنتاج الزوج مع الزيادة في طاقة الأشعة الكهرمغناطيسية وأن هنالك حد أدنى للامتصاص الكلي عند **3 MeV** في الرصاص و **10 MeV** في النحاس و **22 MeV** في الألمنيوم .



شكل 9–5

العلاقة ما بين الطاقة للفوتون والمقاطع المستعرضة الذرية لكل من الأثر الكهرضوئي وتشتت كمبتون وإنتاج الزوج في كل من الألمنيوم والنحاس والرصاص .

5-4-7 معامل الامتصاص Absorption Coefficient

تؤدي جميع الطرق التي تتفاعل فيها أشعة جاما مع المادة إلى نقصان أسي في شدة طاقة الفوتونات الساقطة . وتساوي شدة الأشعة المارة I_d عبر السمك d للماص ما يلي :

$$I_d = I_0 e^{-\mu d} \tag{5-17}$$

حيث أن I_0 شدة الأشعة الساقطة وμ معامل الامتصاص الكلي . وμ عبارة عن مجموع معاملات الامتصاص لكل من الأثر الكهرضوئي وأثر كمبتون وإنتاج الزوج . ومن ثم عرف العلماء نصف السمك $d_{1/2}$ على أنه السمك الذي يؤدي إلى $I_0 \frac{1}{2} = I_d$ و $\frac{0.693}{\mu} = d_{1/2}$. half-thickness

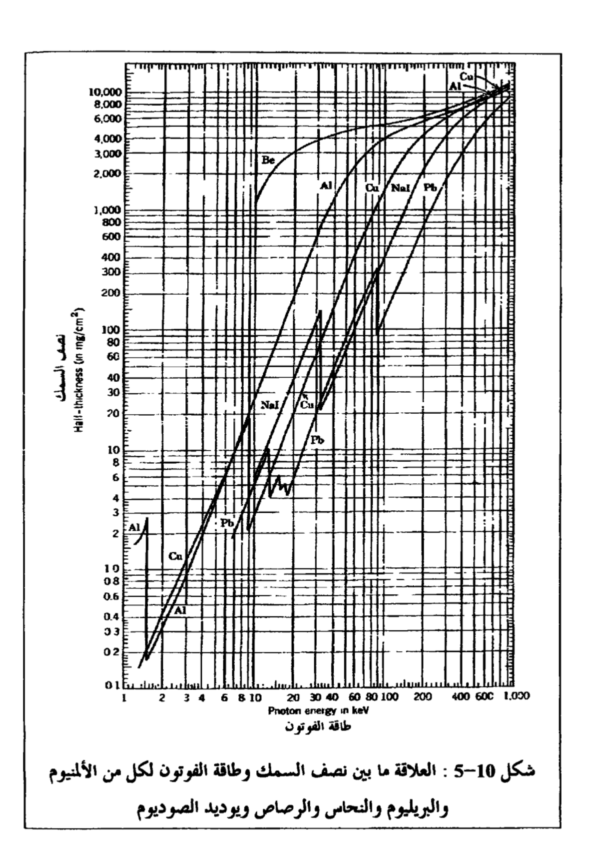
ويعطى سمك الماص في الغالب بدلالة الكثافة السطحية (ρd) غم/سم^2 . فلهذا نكتب المعادلة (17–5) كالآتي :

$$I_d = I_0 e^{-(\mu/\rho)\rho d} \tag{5-18}$$

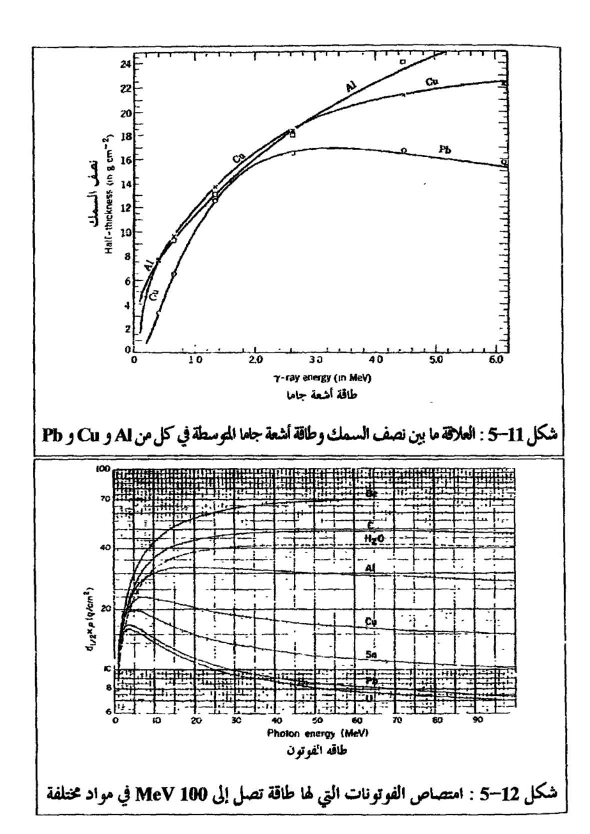
و(μ/ρ) عبارة عن معامل الامتصاص الكتلي .

Mass absorption coefficient

انظر الأشكال 10–5 ، 11–5 ، 12–5 ولاحظ أن محور (ص) في الشكل 12–5 هو $d_{1/2}\rho$ وما لم يتم الامتصاص كلياً عبر الأثر الكهرضوئي فإن قياس الفوتونات الساقطة فقط غير ممكن عملياً . وذلك لحاجة عملية القياس إلى ترتيب هندسي جيد (كوجود مسافة كبيرة بين المصدر والماص وبين الماص والكاشف) أو إلى كاشف يعمل فقط ضمن نطاق ضيق من الطاقة .



شكل 10–5 : العلاقة ما بين نصف السمك وطاقة الفوتون لكل من الألمنيوم والبريليوم والنحاس والرصاص ويوديد الصوديوم



شكل 11–5 : العلاقة ما بين نصف السمك وطاقة أشعة جاما المتوسطة في كل من Al و Cu و Pb

شكل 12–5 : امتصاص الفوتونات التي لها طاقة تصل إلى 100 MeV في مواد مختلفة

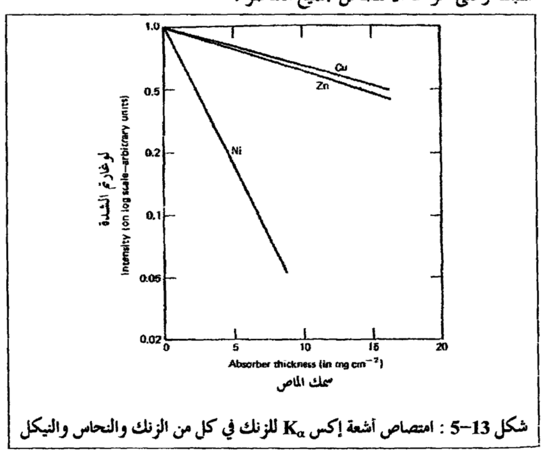
5-4-8 الامتصاص الحرج لأشعة إكس

Critical Absorption of X-rays

لقد درسنا في ما سبق أن احتمالية الامتصاص الكهرضوئي تتوقف تماماً عندما تساوي قيم طاقة جاما أو إكس طاقة ربط الإلكترونات في المستويات الرئيسية (2-4-4) ولقد سمى العلماء هذه الحالات بحواف الامتصاص **absorption edges** . كما استخدم اختلافها من عنصر إلى آخر في قياس إشعاعات إكس المميزة لكل عنصر . ومن أجل أن نفهم الامتصاص الحرج علينا أن نتذكر كيف تنطلق أشعة إكس من الذرة ، فإذا انتقل إلكترون من أحد المستويات الخارجية إلى فراغ في مستوى له طاقة ربط أعلى ، كانتقال إلكترون من L إلى K ، انطلقت K_α أشعة إكس . وأما الامتصاص الكهرضوئي فيحدث إذا كانت طاقة الفوتون كافية لنقل إلكترون من مستوى طاقته إلى مستوى فارغ . ولهذا ينظر للعنصر على أنه ماص رديء لأشعة إكس الخاصة به .

ولا يمكن لطاقة K_α أشعة إكس أن تنقل إلكترون من مستوى K إلى أحد المستويات الخارجية الفارغة في نفس العنصر . ومع ذلك فإن طاقة ربط الإلكترونات تقل كلما قل العدد الذري Z ، ولهذا فإن خط K_α المنبعث من عنصر له عدد ذري Z يتمتع بطاقة قيمتها أكبر بقليل من حافة الامتصاص K لعنصر له عدد ذري أقل بقليل فتمتص بقوة من قبل ذلك العنصر وليس من قبل العنصر الذي يعلوه . فلهذين العنصرين المجاورين معاملات امتصاص مختلفة كثيراً نحو تلك الأشعة ، فيسمى العنصر الذي يمتص أشعة إكس بقوة أكبر بالماص الحرج **Critical Absorber** لتلك أشعة إكس . ويطبق الامتصاص الحرج للخطوط المنبعثة من المستوى L على العناصر الثقيلة . ومن الأمثلة على ما سبق المثال التالي : طاقة K_α أشعة إكس لعنصر

الخارصين Zn (Z = 30) 8.6 KeV ، وحواف الامتصاص لـ $_{29}$Cu و $_{28}$Ni تساوي 9.0 KeV و 8.3 KeV على التوالي. فلذلك فإن $_{28}$Ni ماص جيد لـ K_α أشعة إكس الصادرة عن Zn وليس $_{29}$Cu (شكل 13–5) . أما K_α أشعة إكس لعنصر الجاليوم (Z = 31) فتمتص بقوة من قبل النيكل والنحاس وذلك لأن طاقتها 9.2 KeV ، ولا تمتص من قبل الخارصين الذي له حافة امتصاص K عند 9.7 KeV . تستخدم الماصات الحرجة في طمس أحد خطوط أشعة إكس ليتم قياس الطيف المنبعث من أحد الجيران دون أي تشويش . تحتوي بعض المراجع كدليل الكيمياء والفيزياء Handbook of Chemistry and Physics على جداول لخطوط أشعة إكس المنبعثة وعلى حواف الامتصاص لجميع العناصر .



شكل 13–5 : امتصاص أشعة إكس K_α للزنك في كل من الزنك والنحاس والنيكل

5-5 النيوترونات Neutrons

نظراً لانعدام الشحنة على النيوترونات فإن تفاعلها مع الإلكترونات قليل جداً ولا ينجم عن النيوترونات مباشرة أي تأين أساسي . ويقتصر تفاعل النيوترونات مع المادة على التأثير النووي والذي يتضمن التشتتات المرنة وغير المرنة والتفاعلات النووية مثل (n , γ) و (n , ρ) و (n , α) و $(n , 2n)$ والانشطار .

5-5-1 التخفيف من سرعة النيوترونات

Slowing Down of Neutrons

هناك تشابه كبير بين النيوترونات الحرارية وجزيئات الغاز في توزيع الطاقة عند درجات الحرارة العادية . ولهذا فإنها فعالة في التفاعلات النووية . ولقد قام العلماء بإجراء الكثير من الدراسات النظرية والعملية الهادفة إلى التقليل من طاقة النيوترونات ذات الطاقة العالية والناتجة عن التفاعلات النووية بحيث تصبح نيوترونات حرارية لا تتعدى طاقتها 1 eV .

قد تفقد النيوترونات السريعة جزءاً كبيراً من طاقتها في الاصطدامات غير المرنة مع النوى الثقيلة خاصة . وقد تبين أن هذه الطريقة غير فعالة في إنتاج النيوترونات الحرارية . وتنتج النيوترونات الحرارية عن عدة تصادمات مرنة متتابعة مع النوى . وبناءً على قانون حفظ الزخم فإن النيوترون الذي له طاقة E_0 والمصطدم بمرونة مع نواة ثقيلة يرتد حاملاً معظم طاقته الأصلية ولا يعطي من طاقته أكثر من $4AE_0/(A+1)^2$ للنواة المرتدة (A هو العدد الكتلي للنواة الهدف) . فكلما نقص العدد الكتلي للنواة الهدف ازداد جزء الطاقة المفقود من طاقة النيوترون الحركية والمنتقل للنواة الهدف في التصادم المرن . ولهذا فإن للمواد التي تحتوي على الهيدروجين كالبرافين والماء فعالية كبيرة في التخفيف من سرعة النيوترونات .

نجد في التشتت المرن للنيوترونات ذات الطاقة التي تقل عن 10 MeV تساوي في احتمالية انتقال الطاقة ما بين صفر والحد الأعلى $4AE_0/(A+1)^2$. وعلى هذا فإن احتمالية أن يكون لنيوترون ذات طاقة E_0 طاقة باقية ما بين E و E+dE هي :

$$P(E)dE = \frac{dE}{4AE_0/(A+1)^2} \qquad (5-19)$$

ومعدل طاقة النيوترون بعد ذلك هي :

$$\overline{E} = \int_{E_0[1-4A/(A+1)^2]}^{E_0} P(E)EdE = \frac{(A+1)^2}{4AE_0} \int_{E_0[1-4A/(A+1)^2]}^{E_0} EdE$$

$$= E_0\left[1 - \frac{2A}{(A+1)^2}\right] \qquad (5-20)$$

أي أن معدل قيمة $\frac{E}{E_0}$ لا يعتمد على E_0 ، وتساوي قيمته بعد n من التصادمات ما يلي :

$$\frac{\overline{E}_n}{E_0} = \left[1 - \frac{2A}{(A+1)^2}\right]^n \qquad (5-21)$$

وإن احتمالية أن يكون لنيوترون ذات طاقة E_0 طاقة ما بين E_n و $E_n + dE_n$ بعد عدد n من التصادمات المرنة مع نوى الهيدروجين هي :

$$P_n(E_n)dE_n = \int_{E_n}^{E_0}\left[dE_{n-1}P_{n-1}(E_{n-1})\right]\left[\frac{dE_n}{E_{n-1}}\right] \qquad (5-22)$$

ويمثل القوس الأول في المعادلة (5-22) احتمالية الحصول على طاقة ما بين E_{n-1} و $E_{n-1} + dE_{n-1}$ في (n-1) من التصادمات وأما القوس الثاني فيمثل احتمالية الذهاب من الفسحة $E_{n-1} \leftarrow E_{n-1} + dE_{n-1}$ إلى الفسحة $E_n \rightarrow E_n + dE_n$ بعد عدد n من التصادمات . وبتكامل المعادلة (5-22) ضمن المتغير E_{n-1} نحصل على:

$$P_n(E_n) = \frac{1}{(n-1)!E_0}\left(\ln\frac{E_0}{E_n}\right)^{n-1} \qquad (5\text{–}23)$$

ولقد وجد العلماء أن معدل عدد التصادمات اللازمة لتقليل طاقة النيوترون من E_0 إلى E في مادة عددها الكتلي A هو :

$$\bar{n} = \frac{\ln(E_0/E)}{1-\left[(A-1)^2/2A\right]\ln\left[(A+1)/(A-1)\right]} + 1 \qquad (5\text{–}24)$$

ففي حال كانت التصادمات مع الهيدروجين الذري أو البروتونات ($A = 1$) حصلنا على قيمة للمقام تساوي واحد في المعادلة (5–24) على النحو التالي :

$$\bar{n} = \frac{\ln(E_0/E)}{1-\text{صفر}} + 1 \qquad (5\text{–}25)$$

وتكتب المعادلة (5–25) على الشكل التالي :

$$E_n = E_0 e^{1-\bar{n}} \qquad (5\text{–}26)$$

أي أن معدل عدد التصادمات اللازمة لتحويل نيوترونات طاقتها عدة ملايين إلكترون فولت إلى نيوترونات حرارية طاقتها أقل من 0.04 eV عند درجات الحرارة العادية هو 20 تصادم . وتقوم بهذه العملية طبقة من شمع البرافين سمكها 20سم في أقل من 10^{-3} ثانية . أما المصير النهائي للنيوترونات الحرارية في وسط هيدروجيني مثل الماء أو البرافين فهو أن تلتقط من قبل البروتونات لتكون الديوترونات (^2_1D) ، علماً بأن احتمالية حدوث هذا التفاعل قليلة بالمقارنة مع تشتت النيوترونات ، فلهذا تقوم النيوترونات بحوالي 150 تصادم قبل أن تلتقط من قبل البروتونات . فالماء والبرافين من المواد المستخدمة في تبطيء النيوترونات وذلك لأن احتمالية التقاط الأكسجين والكربون للنيوترون قليلة (أي أن المقطع المستعرض الالتقاطي لكل منهما قليل) بالمقارنة مع تلك للهيدروجين .

وأما الماء الثقيل فله أفضلية على الماء العادي H_2O وذلـك لأن احتماليـة التقـاط النيوترون من قبل الديوتيريوم ^2_1D قليلة بالمقارنة مع الهيدروجين ، ويستخدم الجرافيـت (الكربون) في إبطاء النيوترونات ولكنها تحتاج إلى عـدد أكـبر مـن التصادمـات (حـوالي 120) لتصل بعدها إلى نيوترونات حرارية ويمتاز الجرافيت عن البقية في إمكانيـة تواجـد النيوترونات الحرارية فيه لمدة أطول . ولا يتعدى متوسط العمر للنيوترونات الحرارية في أي مادة من المواد أجزاء من الثانية قبل أن تلتقط . وإذا لم يتـم التقاطهـا فإنهـا سـتتحلل إلى بروتونات وإلكترونات سالبة (ارجع إلى جـ 3—2 و 3—4—3) .

5-5-1 التوزيع الحراري Thermal Distribution

إذا قارنا بين النيوترونات الحرارية وجزيئات الغـاز وجدنـا الحقيقـة المشـتركة وهي أن لا يمكن أن يكون لكـل النيوترونـات الحراريـة نفـس الطاقـة . فتقـل طاقـة النيوترونات أو تزيد نتيجة للاصطدامات مما يعني وجود توزيـع ماكسـول لطاقـة أو لسـرعة النيوترونـات الحراريـة . ويسـاوي ذلـك الجـزء مـن العـدد الكلـي مـن النيوترونات والتي لها سرعة ما بين v و $v+dv$ ما يلي :

$$F(v)dv = 4\pi^{-1/2}\left(\frac{M}{2kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-Mv^2/2kT} dv \qquad (5-27)$$

حيث أن M كتلة النيوتـرون و T درجـة الحـرارة المطلقـة و k ثـابت بولـتزمن . وبعض خصائص هذا التوزيع موجودة في الفصول التي تبحث النظرية الجزيئيـة الحركيـة للغازات ومنها السرعة ذات الاحتمال الأكثر (v_m السرعة الأكثر احتمالاً) .

$$v_m = \left(2\frac{kT}{M}\right)^{1/2} \qquad (5-28)$$

ومعدل السرعة :

$$\bar{v} = \left(\frac{8kT}{\pi M}\right)^{1/2} = 2\frac{v_m}{\pi^{1/2}} \qquad (5-29)$$

ومعدل الطاقة الحركية :

$$\overline{E} = \frac{3}{2}kT \qquad (5\text{–}30)$$

يعتمد معدل طاقة النيوترونات على درجة حرارة الوسط المستخدم في التخفيف من سرعتها . فتوزيع ماكسول غير فعال عند درجات الحرارة المنخفضة بسبب مستويات الطاقة المحافظ عليها في ذرات الوسط المرتبطة ، وأيضاً فهو غير فعال إذا كان مسار النيوترون في الوسط قصير عند جميع درجات الحرارة أو إذا حدث تغيير كبير في التوزيع نتيجة امتصاص النيوترونات أو تسربها من السطح .

يجب أن نوضح الفرق بين توزيع السرعة في الوسط وبين التوزيع التي تكتسبه عينة موجودة في الوسط . ويختلف التوزيعان بسبب أن احتمالية اصطدام النيوترون بالعينة في وقت ما تتناسب طردياً مع v . ونعبر عن التوزيع المتغير بالمعادلة (5–31) . والتوزيع المتغير مهم في التفاعلات النووية وفي حسابات المقطع العرضي .

$$F'(v)dv = 2\left(\frac{M}{2kT}\right)^2 v^3 e^{-Mv^2/2kT} dv \qquad (5\text{–}31)$$

5-6 الوقاية من الإشعاع Radiation Protection

تنجم التأثيرات البيولوجية للإشعاعات عن التغيرات الكيميائية التي تحدث في الخلايا نتيجة التأين والتهيج والتكسير للروابط والإزاحة للذرات . ولتقدير مدى تأثير الإشعاعات على الأعضاء الحية من المواد المشعة الموجودة خارج الأعضاء أو داخل الجهاز الهضمي أو داخل الجهاز التنفسي ، علينا أن لا نأخذ الجرعات الكلية للتأين الناتج في الأعضاء فقط وإنما نأخذ عوامل أخرى ككثافة التأين وسرعة الجرعة ومكان التأثير وسرعة إعطاء وإزالة المادة المشعة .

لم يثبت بالدليل أن التعرض المباشر من قبل الإنسان للإشعاعات غير ضار بالصحة . ومن المحتمل أن تتسبب بعض الطرق المستخدمة في التشخيص والتي تستخدم الإشعاعات في إحداث أورام خبيثة بدل من الكشف عنها فقط . أي أن

التعرض للإشعاع مرتبط بمبدأ المخاطرة/الفائدة (أو المضرة/المنفعة) . ومن سوء الحظ أنه لم يتم لحد الآن قياس تأثير التعرض لكميات صغيرة من الإشعاعات .

5-6-1 قياس الجرعة في الوقاية من الإشعاع

Dosimetry in Radiation Protection

تعرفنا فيما سبق إلى وحدة الريم والراد في (7–4) وإلى العلاقة بينهما والمعامل الخاص الذي يربطهما ، ويعتمد هذا المعامل على عدة عوامل أهمها :

كثافة التأين في الدراسات البيولوجية والتي تقاس بقدرة الإيقاف الخطية **Linear Energy Transfer (LET)** وهي عبارة عن الطاقة الموضوعة في وحدة طول المسار ويسمى هذا المعامل بعامل الجودة **Quality Factor (QF)** ، ويبين الجدول (2–5) بعض القيم التقريبية لـ QF ، وتعكس القيم في الجدول اعتماد QF وقدرة الإيقاف الخطية على الطاقة ومن الحرص أن تستخدم القيم العليا للمدى في القيم المذكورة في الجدول في غياب أي دليل على عكس ذلك . ويبين المثال التالي التطبيقات العملية للمفاهيم التي تعلمناها في هذا الفصل .

Radiation الإشعاع	QF
X and γ rays	1
e^-, e^+ Electrons and positrons	1
(n) Neutrons, energy < 10 keV	3
(n) Neutrons, energy > 10 keV	10
(p) Protons	1-10
(α) Alpha particles	1-20
Heavy ions أيونات ثقيلة	20

جدول 2–5 : قيم عامل الجودة للإشعاعات المختلفة .

مثال (1–5) ما هو معدل الجرعة المتوقع على بعد 50سم من مصدر ^{60}Co نشاطه 100 مليكوري بوحدة الراد/ساعة .

الحل : يواكب كل تحلل من ^{60}Co انطلاق فوتونان بطاقة 1.17 و 1.33 MeV . وللتبسيط سنأخذ معدلهما 1.25 MeV .

يطلق المصدر = $2\times100\times3.7\times10^{7} = 7.4\times10^{9}$ $\frac{\text{فوتون}}{\text{ثانية}}$

فيض جاما على بعد 50سم =

$7.4\times10^{9}/(4\pi\times2500) = 2.3\times10^{5}$ $\frac{\text{فوتون}}{\text{ثانية سم}^2}$

أو $= 2.3\times10^{5}\times1.25\times10^{6} = 2.9\times10^{11}$ eV سم$^{-2}$ ث$^{-1}$

بما أن معامل الامتصاص الكتلي لفوتون طاقته 1.25 MeV في الهواء يساوي تقريباً معامل الامتصاص في الألمنيوم ونصف السمك لذلك الفوتون من الشكل 5–10 يساوي 12.5 غم/سم^2 . وجزء الطاقة المفقود من أشعة جاما/غم سم$^{-2}$ في الهواء هو $\mu/\rho = \frac{0.693}{12.5} = 0.055$.

أي أن الطاقة المفقودة من جاما لدى مرورها في 1غم/سم^2 هواء هي =

$= 0.055\times2.9\times10^{11}\times3600 = 5.7\times10^{13}$ eV/ساعة = 92 إرغ/ساعة .

أي أن الطاقة الممتصة من قبل واحد غرام هواء = $\frac{92}{100}$ راد/ساعة

= 0.92 راد/ساعة .

5-6-2 دليل الوقاية من الإشعاع

Radiation Protection Guide

لم يحدد بشكل واضح الحد الأعلى من مكافئ الجرعة من الإشعاعات المسموح التعرض لها ، وقد يدخل هذا ضمن مبدأ المخاطرة/الفائدة (أو المضرة/المنفعة) المذكور سابقاً . وهذا الكلام صحيح في كثير من الحالات في ما عدا بعض طرق العلاج التي تستخدم فيها جرعات كبيرة من الإشعاع الموجه نحو الأورام . ويتساءل الكثير من المختصين إذا كان هناك مستوى أدنى من الجرعات لا ينتج عنه تأثيرات جينية وجسدية . وهناك صعوبة كبيرة في قياس التأثيرات الناجمة عن جرعات صغيرة من الإشعاعات في وجود التغيرات الجينية والجسدية الطبيعية المستمرة . ولهذا افترض العلماء أن التأثيرات الضارة للإشعاعات تتناسب طردياً مع مكافئ الجرعة الممتص ، مما يعني عدم وجود مستوى أدنى .

وفي ضوء هذه الصعاب صدر دليل الوقاية من الإشعاعات والذي اعتمد الدراسات العلمية للتأثيرات البيولوجية الناجمة عن الإشعاعات في الثمانين سنة الماضية . وتشتمل هذه الدراسات على :

أ) الفحوص المخبرية على الحيوانات .

ب) تأثيرات العلاج بالإشعاع على المرضى والمعالجين .

جـ) الاستخدامات الصناعية للإشعاعات .

د) الأضرار التي لحقت بسكان هيروشيما وناغازاكي نتيجة للقنابل النووية الملقاة عليهما .

ويحتوي الدليل على مجموعتين :

أ) الأشخاص الذين يتعرضون للإشعاعات نتيجة العمل الذي يقومون به .

ب) عامة الناس بشكل كبير .

ولقد أوصى الدليل للأشخاص في المجموعة (أ) بأن لا تتعرض أجسامهم الكاملة لأكثر من 5 ريم/السنة ، وقد تختلف الجرعة من منطقة إلى أخرى في الجسم، فقد يصل الحد الأعلى المسموح به للأيدي إلى 75 ريم/الساعة ، ولا يجب أن تتعدى الجرعة التراكمية على المدى الطويل لشخص عمره N سنة القيمة

= 5 ريم(N−18)

وأما الأشخاص من عامة الشعب (المجموعة ب) فلقد أوصى بأن لا تتعرض لأكثر من 0.50 ريم/السنة بما في ذلك الإشعاع الطبيعي (الناتج عن الأشعة الكونية والنشاط الإشعاعي في المحيط الذي نعيش فيه والنظائر المشعة الموجودة داخل الجسم) والاستخدامات الطبية . وبلغ الإشعاع الطبيعي في الولايات المتحدة عند سطح البحر 0.12 ريم/السنة ويزداد إلى 0.25 ريم/السنة على ارتفاع 1500م فوق سطح البحر . أما LD_{50} في الإنسان فيساوي 500 ريم يتعرض لها الإنسان في فترة قصيرة من الزمن . ومن الصعب تحديد مكافئ الجرعة التي يحصل عليها الإنسان من عمليات التشخيص الطبي ، وقد قدرها البعض بعدة مئات من المليريم في السنة في معظم الأحيان وقد تصل إلى أعلى من ذلك في بعض الحالات . وفي الخلاصة ليس هناك إجماع على أن القيم المقترحة في الدليل رزينة وحريصة ، وظهر بعض الناس الذين يطالبون بتخفيض القيم إلى النصف .

5-6-3 مصادر الإشعاع الداخلية

Internal Radiation Sources

يتعرض الجسم للإشعاعات إما من مصادر داخلية أو خارجية . وقد تبقى

بعض النظائر المشعة التي تدخل جسم الإنسان عبر الجهاز الهضمي أو التنفسي لفترات زمنية مختلفة كل حسب طبيعته . ولهذا وجب علينا الحرص لتجنب دخول المواد المشعة لأجسامنا . ويبين الجدول (3–5) الحد الأقصى المسموح به من التركيز لبعض النظائر المشعة في السوائل المهضومة والهواء المستنشق كما يبين الحد الأعلى المسموح به من الكميات في الجسم .

النواة Nuclide	العاملون Occupational Exposure (Restricted Area) الهواء InAir ($\mu Ci\ ml^{-1}$)	الماء In Water ($\mu Ci\ ml^{-1}$)	عامة الناس General Public (Unrestricted Area) الهواء InAir ($\mu Ci\ ml^{-1}$)	الماء In Water ($\mu Ci\ ml^{-1}$)	الأعضاء الحرجة In Critical Organ (μCi)
$^{3}H(H_2O)$	5×10^{-6}	1×10^{-1}	2×10^{-7}	3×10^{-3}	1000
$^{14}C(CO_2)$	4×10^{-6}	2×10^{-2}	1×10^{-7}	8×10^{-4}	300 (fat) الدهن
^{24}Na	1×10^{-6}	6×10^{-3}	4×10^{-8}	2×10^{-4}	7.0 (G.I. tract) الجهاز الهضمي
^{32}P	7×10^{-8}	5×10^{-4}	2×10^{-9}	2×10^{-5}	6.0 (bone) العظام
^{35}S	3×10^{-7}	2×10^{-3}	9×10^{-9}	6×10^{-5}	90.0 (testes) الخصية
^{60}Co	3×10^{-7}	1×10^{-3}	1×10^{-8}	5×10^{-5}	10.0 (G.I. tract) الجهاز الهضمي
^{90}Sr	1×10^{-9}	1×10^{-5}	3×10^{-11}	3×10^{-7}	2.0 (bone) العظام
^{131}I	9×10^{-9}	6×10^{-5}	1×10^{-10}	3×10^{-7}	0.7 (thyroid) الغدة الدرقية
^{137}Cs	6×10^{-8}	4×10^{-4}	2×10^{-9}	2×10^{-5}	30 (whole body) الجسم
^{210}Po	5×10^{-10}	2×10^{-5}	2×10^{-11}	7×10^{-7}	0.03 (spleen) الكبد
^{226}Ra	3×10^{-11}	4×10^{-7}	3×10^{-12}	3×10^{-8}	0.1 (bone) العظام
^{238}U	7×10^{-11}	1×10^{-3}	3×10^{-12}	4×10^{-5}	0.005
^{239}Pu	2×10^{-12}	1×10^{-4}	6×10^{-14}	5×10^{-6}	0.04 (bone) العظام

جدول 3–5 : الحد المسموح به بيولوجياً لبعض النظائر المشعة .

5-6-4 المخاطر التي نواجهها أثناء التعامل مع المواد المشعة

Hazards Encountered with Radioactive Materials

تبين لنا مما سبق أهمية الحرص في التعامل مع المواد المشعة أو المصادر المشعة ولهذا وجب على كل شخص التقليل من كمية الإشعاع التي يتعرض لها إلى أدنى حد ممكن بحيث لا يتعدى الحدود القصوى المسموح بها . ويتم تخفيض جرعة التعرض بالطرق التالية :

أ) الحجاب الواقي .

ب) المسافة .

جـ) أ و ب .

وتعتبر طريقة التعامل مع الإشعاعات من الأمور المهمة التي يجب الانتباه لها حتى لو كان مستوى الإشعاع قليل جداً وذلك لخطورة انتشار التلوث بالمواد المشعة .

يؤدي التلوث بالمواد المشعة إلى زيادة الإشعاع الطبيعي والضرر بالتجارب التي تستخدم مستويات قليلة من النشاط الإشعاعي . وهذا يتوجب درجة عالية من الانتباه لضبط التلوث وللحيلولة دون التعرض المفرط للإشعاعات ، وهذا يعتمد على عدة عوامل منها مقدار النشاط الإشعاعي الذي نتعامل معه ، طبيعة وطاقة الإشعاعات المنطلقة ، نصف عمر المادة المشعة وأخيراً الخواص الكيميائية للمادة المشعة .

هناك تدابير وقائية عامة يجب توفرها في كل الأعمال التي تستخدم المواد المشعة . وتشتمل على :

أ) أجهزة مسح وقياس للإشعاعات لمعرفة مستوى الإشعاعات والاحتياطات الواجب توفرها .

ب) تجرى التجارب في خزانة الغازات التي تسمح بمرور تيار من الهواء أو في الصناديق الجافة .

جـ) ومن أجل أن نحتوي أي دلق للمواد المشعة علينا العمل في صواني مخصصة أو نغطي سطوح الطاولات في المختبر بورق ماص يمنع التسرب .

د) عدم استخدام الفم لسحب السوائل بواسطة الماصة .

هـ) يجب استخدام القفازات والملاقط عند التعامل مع المواد المشعة حتى لو كان نشاط العينة بالميكروكوري .

و) إذا تعاملنا مع مستويات عالية من المواد المطلقة لأشعة جاما (مليكوري) وجب الوقوف خلف حجاب من الرصاص واستخدام الملاقط وأدوات أخرى مناسبة.

ز) وفي حال وصلت المستويات إلى درجة عالية جداً (10^{12} جاما فوتون/الدقيقة) وجب استخدام طرق التحكم عن بُعد . ولقد أدى ذلك إلى تطوير طرق العمل الكيميائية لتتناسب مع التحكم عن بُعد .

الأسئلة :

1) ما هو المدى لأيونات ^{14}N طاقتها 120 MeV في الألمنيوم .

2) استخدم المعادلة (2–5) في حساب قدرة الإيقاف لدقائق ألفا طاقتها 12 MeV في الرصاص (I = 788 eV) .

قارن بين القيمة المحسوبة مع القيمة المقدرة من الشكلين (4–5) و (5–5) .

3)

أ) ما هو سمك صفيحة الألمنيوم اللازمة لخفض طاقة أيونات ^{4}He من 40 MeV إلى 32 MeV .

ب) ما مقدار الطاقة التي يفقدها 20 MeV ديوترون (أيون ديوتيريوم) لدى مروره عبر نفس الصفيحة .

4) تم قياس منحنى الامتصاص لعينة تطلق إشعاعات γ و β باستخدام عداد التناسب الغازي وصفائح من الألمنيوم الماص ، كما هو مبين في الجدول .

سمك ماص الألمنيوم غم/سم^2	النشاط الإشعاعي (تحلل/دقيقة)
0	5800
0.070	3500
0.130	2200
0.200	1300
0.300	600
0.400	280
0.500	120
0.600	103

101	0.700
100	0.800
98	1.00
92	2.00
80	4.00
65	7.00
53	10.00
40	14.00

أ) قدر طاقة β القصوى بوحدة MeV .

ب) ما هي طاقة أشعة جاما .

جـ) ما هي قيمة معامل الامتصاص لأشعة γ في الرصاص ؟

6) ما هي قيمة التفاوت لدقائق ألفا طاقتها 32 MeV في الهواء .

7) ارجع إلى الجداول الخاصة بطيف أشعة إكس وبمعاملات الامتصاص لأشعة إكس في دليل الكيمياء والفيزياء في المكتبة لتحدد الماصات الحرجة اللازمة في التعرف على أشعة إكس K_α في كل من أ) ^{37}Ar ب) ^{101}Pd .

8) وجد أن معدل الجرعة لمصدر من ^{137}Cs مطلق لأشعة جاما على بعد 60سم منه 137 مليراد/الساعة . فإذا كانت نسبة التحلل بجاما 85٪ وطاقة جاما 0.66 MeV . فاحسب

أ) قدر قوة مصدر ^{137}Cs بوحدة المليكوري .

ب) ما هو سمك الرصاص (بوحدة المليمتر) اللازمة لخفض معدل الجرعة على بعد 60سم إلى 3 مليراد/الساعة .

9) وضع مصدر من ^{137}Cs قوته 100 مليكوري على بعد 20سـم مـن بـاطن الكف .

أ) احسب فيض أشعة γ لكل سم^2 لكل ثانية الساقط على باطن الكف .

ب) احسب معدل الجرعة بوحـدة الـراد/ثانيـة لما جاء في (أ) (افـترض أن الكف مكون من الماء وأن قيمة μ/ρ لـ 0.66 MeV هي 0.03 سم^2/غم) .

10) احسب معدل عدد الاصطدامات المرنة اللازمة لإبطاء النيوترونـات مـن 10^6 eV إلى 10^{-2} eV في كل من أ) ^{238}U ب) ^{12}C جـ) ^{1}H .

الفصل السادس
أجهزة كشف وقياس الإشعاع النووي
RADIATION DETECTION AND MEASURMENT

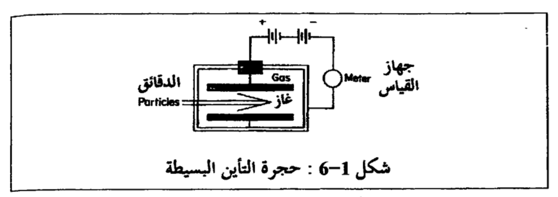
6-1 مقدمة

تستخدم العدادات Counters في الكشف عن الإشعاعات وقياسها وتعتمد العدادات في عملها على تفاعلات الإشعاعات مع المادة من تأين وتهيج كما جاء في الفصل الخامس . ففي عدادات التناسب وحجرات التأين وشبه الموصلات وجايجر تُجمع الشحنة الكهربائية لأزواج الأيونات ثم تكبر إلكترونياً . يحدث مرور الدقائق وأشعة جاما في بعض المواد العضوية وغير العضوية تهيج في المستويات الذرية والتي تتحلل بعد ذلك بإطلاق الضوء في المنطقة المرئية أو القريبة منها . وفي عدادات الوميض يتحول الضوء الناتج إلى نبضات كهربائية وبهذه الطريقة يتم عد الدقائق .

ولقد استخدم العلماء عدادات ودوائر كهربائية معقدة في القياسات الخاصة، كما في تشخيص الأنواع الجديدة من الدقائق . وسندرس في هذا الفصل أشهر أنواع العدادات .

6-2 حجرات التأين Ionization Chambers

وهي من أبسط الأنواع ومبدأ عملها هو تكون الإلكترونات والأيونات الموجبة نتيجة مرور الدقائق المشحونة في الغاز الموجود داخل الحجرة والتي تتجمع على القطبين بتأثير المجال الكهربائي . ويبين الشكل (1–6) حجرة التأين البسيطة والتي تتجمع فيها الإلكترونات على اللوحة العليا ذات الشحنة الموجبة والأيونات الموجبة على اللوحة السفلى ذات الشحنة السالبة . ولا يشترط استعمال غاز معين في هذه الحجرات .



شكل 1–6 : حجرة التأين البسيطة

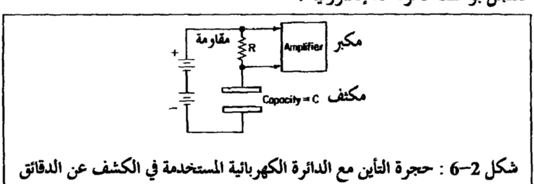
فإذا مر N من الدقائق/الثانية فإنها ستفقد E MeV من الطاقة والشحنة الكلية الناتجة (موجبة وسالبة)/الثانية تساوي :

$$Q = \frac{2NEe \times 10^6}{35} \text{ e.s.u./sec} \qquad (6-1)$$

حيث أن شحنة زوج الأيونات هي 2e وأن معدل الطاقة المفقودة لكل زوج 35 eV .

فإذا كانت قوة المجال الكهربائي كافية كان من الممكن تجميع كل الإلكترونات والأيونات الموجبة مما يعني أن التيار المار في الدائرة يساوي $Q/2$ ، وهي الشحنة اللازمة لإزالة الإلكترونات ومعادلة الأيونات الموجبة . وقد قدرت الشحنة اللازمة ببعض المئات من الفولتات . وإذا استخدم مقياس للتيار فلن يُعد الجهاز المبين في الشكل (1–6) كعداد وذلك لأن مقياس التيار بطيء جداً وغير حساس لوصول كل دقيقة لأنه سيعمل على دمج تأثير عدد من الدقائق ، أي أن القراءة ستتناسب مع عدد الدقائق الواصلة في الثانية ومع طاقتهم المفقودة في الغاز ويستفاد من هذا الكاشف في قياس الفيض الكبير من الدقائق ، فإذا طليت الجدران الداخلية للحجرة بطبقة من البورون تمكنا من قياس فيض النيوترونات وذلك لأن ^{10}B يتفاعل نووياً مع n منتجاً ^{7}Li ودقيقة α ، ومن ثم يتم قياس التأين الناتج عن دقائق α و ^{7}Li .

إذا قمنا بتوصيل حجرة التأين في الشكل (6–1) مع الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل (6–2) استطعنا الكشف عن وصول كل دقيقة . فتتجمع الإلكترونات الحرة على اللوحة الموجبة في حوالي 10^{-6} ثانية ، بينما تحتاج الأيونات الموجبة الأثقل إلى 10^{-3} ثانية لتصل إلى اللوحة السالبة . ويؤدي تجمع الشحنة إلى مرور نبضة كهربائية في المقاومة R . ويتناسب فرق الجهد عبر المقاومة R مع التيار المار ، فكلما مرت دقيقة مؤينة ازداد فرق الجهد ازديادة سريعة ومن ثم ينقص مع موت نبضة التيار ولهذا فإن قيمة R عالية جداً حوالي 10^{9} أوم ويؤدي مرور تيار صغير جداً فيها إلى نبضة جهد يسهل قياسها . بعد ذلك تكبر هذه النبضة ومن ثم تسجل بواسطة دائرة عد إلكترونية .



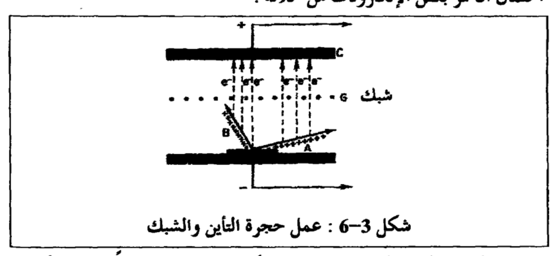
شكل 2–6 : حجرة التأين مع الدائرة الكهربائية المستخدمة في الكشف عن الدقائق

وإذا صمم العداد والمكبر للكشف عن نبضة الإلكترون الصاعدة سريعاً فقط فلا بد أن يسمح للإلكترونات بالتحرك السريع داخل الغاز في الحجرة . بعض الغازات مثل الأوكسجين والأبخرة التي تحتوي الهالوجينات لديها القدرة على التقاط الإلكترونات من قبل الجزيئات المتعادلة لتكون أيونات سالبة بطيئة الحركة ، وهذا يستوجب استبعاد هذه الغازات من حجرات الغاز المستخدمة ، واستبدالها بغاز الأرغون المخلوط بنسبة قليلة من الميثان أو ثاني أكسيد الكربون .

تستخدم حجرة التأين والدائرة الكهربائية (شكل 1–6 و 2–6) في الكشف

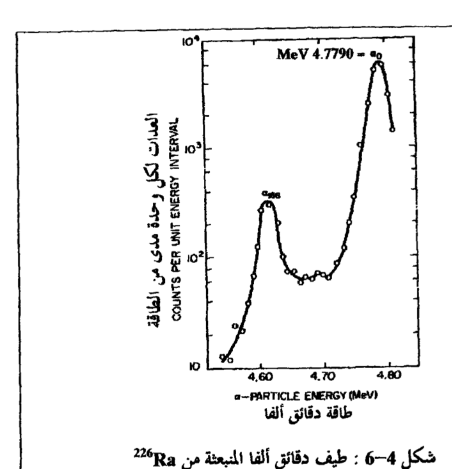
عن الدقائق المشحونة فقط ولا تصلح لقياس طاقة الدقائق .

ويعتبر قياس طاقة دقائق α من مصدر موضوع فوق القطب السالب من أكثر التطبيقات شيوعاً . حيث تنطلق دقائق α نحو الغاز وفي جميع الاتجاهات كما في الشكل (3–6) (A و B) . ثم تنتقل الإلكترونات مباشرة من جميع المسارات بسرعة نحو القطب المجمع C وتبقى الأيونات الموجبة في الخلف متسببة بشحنة صغيرة على C ، وتعتمد قيمة الشحنة على المسافة بين C ومركز ثقل مسار الأيون الموجب ، فالمسافة للمسار B أقل من تلك للمسار A . ولهذا فالنبضة الناتجة عن دقيقة B أقل من تلك الناتجة عن دقيقة A ، حتى لو تسببت كل منهما بنفس العدد من أزواج الأيونات ، وللتقليل من هذا التأثير وضع الشبك G كحجاب واق إلكتروستاتيكي بين الأيونات الموجبة والمجمع . ويعمل هذا الحجاب بجهد سالب كافي ليمنع الإلكترونات من أن تنجذب له ، وبما أنه يتكون من أسلاك رفيعة (قطرها 0.005 بوصة) وتبعد عن بعضها البعض حوالي 0.03 بوصة ، فهناك احتمال أن تمر بعض الإلكترونات من خلاله .



شكل 3–6 : عمل حجرة التأين والشبك

يعطي هذا النوع المحسن من حجرات التأين نبضة تتناسب طردياً مع عدد أزواج الأيونات الناتجة عن دقيقة ألفا ومع طاقتها وبغض النظر عن اتجاه المسار في الحجرة .



شكل 4–6 : طيف دقائق ألفا المنبعثة من ^{226}Ra

ويبين الشكل (4–6) طيف النبضة الناتجة عن عينة من ^{226}Ra . وترمز α_0 إلى طاقة الدقائق الناجمة عن التحلل إلى المستوى الأرضي في ^{222}Rn و α_{188} عن التحلل إلى مستوى التهيج عند 188 KeV . وتنتج القمة في الوسط عن الكشف المتزامن لدقائق α من α_{188} وإلكترون التحول K الناتج عن تحلل مستوى التهيج في ^{222}Rn .

يعتمد وقت تجميع الإلكترونات على سرعة تحركها في الغاز وهي في طريقها إلى المجمع . وتبطء الإلكترونات السريعة الأولية نتيجة لاصطدامها بـذرات الغاز ، علماً بأن قدرة الأرغون على إيقاف الإلكترونات ذات الطاقة القليلة ضعيفة . ويعزى هذا إلى توزيع الإلكترونات المكتمل والمستقر في الأرغون وطاقة تأينه العالية فلا يمكن أن تتكون مستويات ذات طاقة قليلة نتيجة للاصطدامات غير المرنة مع الإلكترونات ، علماً بأن طاقة مستوى التهيج الأول 11.5 eV . وتعزى الزيادة

الكبيرة في معدل المسافة بين ذرات الأرغون والإلكترونـات ذات الطاقة الـتي تقـل عن 10 eV إلى ظاهرة كمية ميكانيكية تسمى بتأثير رمسور Ramsauer effect، ونحن نعلم أنه من غير الممكن إبطاء الإلكترونـات في الأرغـون النقـي إلى 10 eV . وتساوي سرعة تحرك الإلكترونات v في الغاز الذي له ضغط P وتحـت تأثـير المجـال الكهربائي E(ڤولت /سم) ما يلي :

$$v = \frac{eE\lambda}{P\sqrt{2m\varepsilon}} \qquad (6-2)$$

حيث أن m كتلة الإلكترون ، و ε معدل الطاقة الحركيـة للإلكترونـات و λ المسار الحر المتوسط بين الاصطدامات .

إذا أضفنا نسبة قليلـة مـن ثـاني أكسـيد الكربـون CO_2 أو الميثـان CH_4 إلى الأرغـون ازدادت احتماليـة الاصطدامـات غـير المرنـة وذلـك لأن لهـذه المركبـات مستويات اهتزازية ودورانية ذات طاقة قليلة لديهـا القـدرة علـى اكتسـاب الطاقـة نتيجة للاصطدامات مع الإلكترونات . ولهذا يساوي معدل الطاقـة ε للإلكترونـات في الأرغون المحتوي لهذه الجزيئات عُشـر (0.1) ذلـك في الأرغـون النقـي . ويـؤدي تأثـير رمسـور إلى الزيـادة الكبـير في λ ، وتـزداد السـرعة v نتيجـة لهــذه الزيــادة والنقصان في ε . فإذا أضفنا 10٪ من CH_4 أو CO_2 نقص الزمـن الـلازم لتجميـع الإلكترونات في حجرة التأين المملوءة بالأرغون وزمن التحليل .

6-3 الكشافات شبه الموصلة Semiconductor Detectors

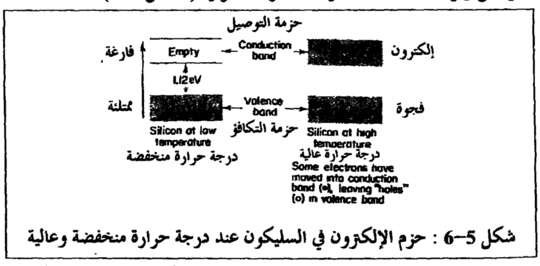
تستخدم العديد من الكشافات ظاهرة شبه التوصيــل في بلـورات السـليكون والجرمـانيوم ، وتسـمى هـذه العـدادات بعـدادات الحالـة الصلبـة وتسـتخدم هــذه العدادات في تجارب التفاعلات النووية والطيف النووي .

ومن أجل أن نفهم طريقة عملها علينا دراسة الخواص الكهربائية للسـليكون

والجرمانيوم . وسنبدأ بدراسة السليكون .

تحتوي ذرة السليكون المعزولة على أربع إلكترونات تكافؤ وتستخدم هذه الإلكترونات في عمل الروابط الكيميائية في بلورة السليكون ، أي أن هذه الإلكترونات مقيدة ولا يمكنها التحرك بحرية في شبكة السليكون . ولهذا فإن السليكون النقي موصل ضعيف للكهرباء عند درجة حرارة الغرفة . وتتأثر مستويات الطاقة العادية في ذرة السليكون المعزولة كثيراً بوجود ذرات السليكون المحيطة بها في الحالة البلورية .

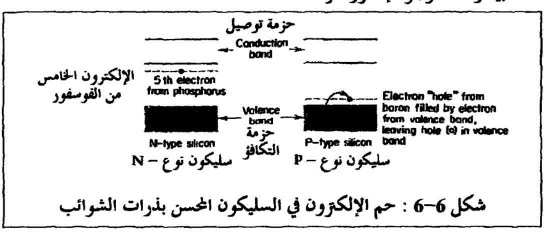
تقع حزمة التوصيل فوق حزمة التكافؤ بحوالي 1.12 eV وتتكون حزمة التوصيل من حزمة عريضة من المستويات ، وتتحرك فيها الإلكترونات بحرية وذلك لأنها لا ترتبط مع أي ذرة بعينها من ذرات السليكون ، وفي العادة تكون هذه الحزمة (حزمة التوصيل) فارغة من الإلكترونات ولهذا فإن السليكون موصل ضعيف . يؤدي التهييج الحراري إلى انتقال الإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل ويزداد عددها كلما ازدادت درجة الحرارة (الشكل 5–6) .



شكل 5–6 : حزم الإلكترون في السليكون عند درجة حرارة منخفضة وعالية

إذا وضعنا ذرة الفسفور ذات الخمس إلكترونات تكافؤ في بلورة السليكون،

فإنها ستستخدم أربع إلكترونات في عمل روابط مع ذرات السليكون المحيطة بهـا ، وأما الإلكترون الخامس فسيحتل مستوى طاقة أقل من حزمة التوصيل كما هو مبين في الشكل (6–6) . ولهذا سمـي الفسـفور بالشـائبة المانحـة وسمـي السـليكون الـذي يحتوي على مقدار ضئيل مـن الشـائبة المانحـة بـالنوع –N N-type وترمـز N إلى السالبية وذلك لوجود إلكترون زائد .

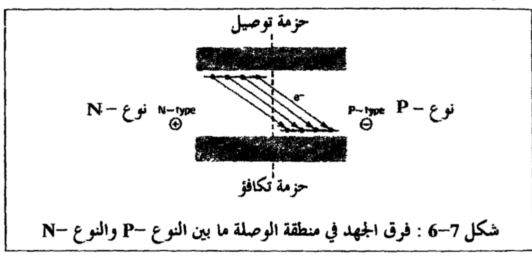


شكل 6–6 : حم الإلكترون في السليكون المحسن بذرات الشوائب

وأما إذا أضيفت ذرة البـورون ذات الثـلاث إلكترونـات تكـافؤ إلى بلـورة السليكون كان هناك إلكترون ناقص في موقـع البـورون مما سـيؤدي إلى تعبئـة هـذا الثقب (الفجوة) hole من قبل إلكترون في حزمـة التكـافؤ وتكُون ثقـب في حزمـة التكافؤ وسيحتل هذا الإلكترون مستوى من الطاقة أعلى بقليل مـن حزمـة التكـافؤ (الشكل 6–6) وذلك لضعـف قـوة جـذب البـورون لهـذا الإلكـترون بالمقارنـة مـع السليكون . وتسـمى هذه الشوائب بالشوائب المتقبلة والسليكون الذي يحتوي على مقـدار ضئيـل منهـا بـالنوع –P P-type ، وترمـز P إلى الإيجابيـة وذلـك لوجـود إلكترون ناقص . ولقد سمي السليكون الـذي لا يحتـوي على شـوائب وعلـى عـدد متساوي من الذرات المانحة والمتقبلة بالأصيل Intrinsic .

يحمل الإلكترون الزائد في النوع –N تياراً كهربائياً ، فلهذا فإنه موصل أكثر

من السليكون النقي ، كما تجعل الثقوب في حزمة التكافؤ في النوع -P المادة موصلة للتيار الكهربائي على الرغم من ثبات ذرات السليكون والبورون في أماكنها . وإذا وصلنا هذه المادة بقطبين موجب وسالب بينهما فرق جهد تحركت الإلكترونات نحو اليسار الموجب والتقطت الثقوب إلكترونات من ذرات السليكون على اليمين ، وهذا يعني أن ذرة السليكون الفاقدة لإلكترونها ستصبح موقع لثقب. ويمكن أن تعاد هذه العملية على أن يتحرك الثقب نحو اليمين والإلكترون نحو اليسار .



شكل 7-6 : فرق الجهد في منطقة الوصلة ما بين النوع -P والنوع -N

تخيل الآن ما سيحدث إذا وضعنا قطعة من النوع -P من السليكون ملاصقة لقطعة من النوع -N من السليكون (شكل 7-6) ، ستتحرك الإلكترونات الموجودة في مستوى طاقة أعلى في النوع -N عبر الحدود لتملأ الثقوب في النوع -P والموجودة في مستوى طاقة أقل . وهذا سيؤدي إلى فرق في الجهد في منطقة الوصلة بين النوع P و N من السليكون (شحنة سالبة وموجبة على الترتيب) . وكلما ازداد فرق الجهد نقص الفرق في مستويات الإلكترونات في النوعين إلى أن يصل إلى الصفر . وهذا يشبه حالة الاتزان التي لا يمر فيها التيار عبر الوصلة في أي من الاتجاهين ، أي أن كل الإلكترونات في النوع -N قد تحركت عبر الحدود لتملأ

جميع الثقوب في النوع –P وهذا يجعل السليكون الموجود عند الوصلة يستنفذ كل حاملي التيار فيصبح غير موصل .

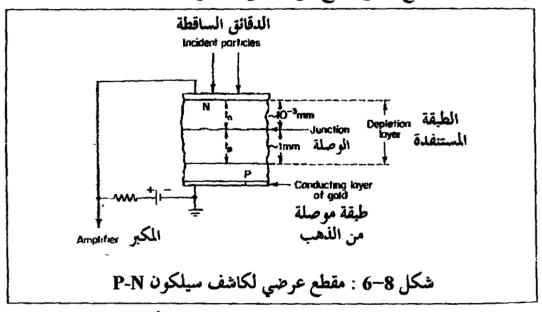
وإذا ازداد فرق الجهد أكثر من قبل عبر الوصلة ، أصبحت المنطقة –N أكثر إيجابية مما سيؤدي إلى تحرك الإلكترونات في المنطقة –N نحو القطب الموجب وبعيداً عن الوصلة . كما ستتحرك الثقوب في المنطقة –P بعيداً عن الوصلة ونحو القطب السالب . مما يعني زيادة في سمك المنطقة المستنفذة لحاملي التيار وغير الموصلة ، وتأثر وصلة P-N باستقطاب عكسي .

أما إذا أثرنا على الوصلة بجهد معاكس للجهد السابق بحيث يصبح النوع –N سالباً والنوع –P موجباً فستتحرك الإلكترونات نحو المنطقة غير الموصلة من اتجاه وستتحرك الثقوب نحو نفس المنطقة من الاتجاه الآخر ، وهذا سيجعل المنطقة موصلة وسيمر تيار كبير عبر الوصلة .

تعمل الوصلة P-N وكأنها صمام ثنائي تمرر التيار في اتجاه ولا تمرره في الاتجاه المعاكس . تستخدم ثنائيات السليكون والجرمانيوم كمقومات للتيار في الأجهزة الحديثة .

أما إذا استخدمت وصلة P-N كعداد للدقائق فيجب أن تكون دائماً في وضع الاستقطاب العكسي . يُحدث مرور الدقائق المشحونة في المنطقة المستنفذة تهيجاً للإلكترونات إلى حزمة التوصيل وتكون الثقوب في حزمة التكافؤ . ويحرك المجال الكهربائي الإلكترونات نحو الجانب (N) الموجب والثقوب نحو الجانب (P) السالب . فتجري نبضة تيار إلى أن يصل كل حاملي التيار سطح الكاشف ، ويعتمد زمن النبضة على سمك الكاشف وجهد الاستقطاب العكسي ، ويتراوح الزمن من حوالي 10^{-7}–10^{-8} ثانية .

تعمل عدادات شبه الموصلة بنفس مبدأ عمل حجرة التأين ، وتصنع العدادات التي تحتوي على وصلة سليكون P-N بطرق مختلفة ، أفضلها يتم بنشر الفوسفور في السليكون إلى عمق 10^{-3} ملم وعلى شرط أن يحتوي السليكون على كمية قليلة جداً من الشائبة من النوع P– (كما في الشكل 8–6) ، وتتكون الوصلة مباشرة تحت السطح حيث يلغي تركيز الفوسفور (الشائبة من النوع N–) تركيز الشائبة من النوع P– بالتمام . ثم يتم تبخير طبقة موصلة من الذهب على الجهة الخلفية تثبت عليها الوصلات الكهربائية . ونبقي على الوجه الأمامي للقرص جهد موجب بالنسبة للوجه الخلفي وذلك لتكوين طبقة مستنفذة من المانحين والمستقبلين ولتجميع التأين الناتج عن الدقائق المشحونة .



شكل 8–6 : مقطع عرضي لكاشف سيلكون P-N

يزداد سمك الطبقة المستنفذة مع ازدياد الجهد المطبق أو المستخدم ، كما في المعادلتين التاليتين :

$$t_n = \left(\frac{\varepsilon V}{2\pi e N_n} \right)^{1/2} \qquad (6-3)$$

$$t_p = \left(\frac{\varepsilon V}{2\pi e N_p}\right)^{1/2} \qquad (6\text{–}4)$$

وتعرف t_n و t_p حسب ما جاء في الشكل (8–6) ، أما ε فهو ثابت العزل للسليكون ، V الجهد المطبق ، e شحنة الإلكترون ، N_n و N_p عدد ذرات الشوائب من النوع –N والنوع –P في وحدة الحجم على الترتيب . وبما أن كمية الفسفور المنتشرة كبيرة فإن N_n كبيرة و t_n صغيرة . وأما الجزء الأكبر من الطبقة المستنفذة t_p فهو الحساس في الكشف عن الإشعاعات . ومن أجل أن تكون الطبقة الحساسة ذات عمق كبير فيجب أن تكون N_p صغيرة جداً ، وهذا يعني أن يكون للسليكون درجة نقاوة عالية جداً . وهذه الدرجة من النقاوة متوفرة لأنها تستخدم في المقومات والصمامات الثنائية وغيرها من الأجهزة والأدوات الإلكترونية .

يختلف السليكون (والجرمانيوم) عن بقية المواد في الطاقة المفقودة من الدقيقة في تكوين زوج من الأيونات ، فتلك تستهلك حوالي 35 eV/زوج من الأيونات ، أما السليكون والجرمانيوم فيحتاجان إلى 3.6 eV/زوج من الأيونات وذلك لأن حزمة التوصيل أعلى بـ 1.12 eV من حزمة التكافؤ . وهذا لا يعني أن مدى الدقائق فيهما كبير . ولا يختلف السليكون والجرمانيوم عن بقية المواد الأخرى في الحدث الرئيسي الذي تفقد فيها الدقيقة طاقتها ، علماً بأن جزء كبير من الطاقة الممتصة فيهما ينتهي في التأين الثانوي . تعتمد استبانة الطاقة التي يمكن الحصول عليها من عداد ما على التذبذب (التأرجح) الإحصائي في إعداد أزواج الأيونات الناتجة من الإشعاع الساقط . ويفترض في العداد المثالي عدم الاعتماد التام لكل حدث تأين على أحداث التأين الأخرى . ولهذا يتناسب عرض الطاقة لقمة الطيف طردياً مع الجذر التربيعي لعدد N من أزواج الإلكترون–الثقب الناتجة عن كل

دقيقة . وذلك لأن التذبذب في N من الأحداث المستقلة يتناسب طردياً مع $\sqrt{N}$.

$$\varepsilon\sqrt{N} = \Delta E \text{ , عرض القمة} \qquad (6-5)$$

حيث ε معدل الطاقة المفقودة من الدقيقة لكل زوج من الإلكترون-الثقب ، وأن :

$$N = \frac{E}{\varepsilon} \qquad (6-6)$$

حيث E طاقة الدقيقة الساقطة ، وأن الاستبانة تساوي :

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{E}} \qquad (6-7)$$

وفي الواقع العملي فإن أحداث التأين ليست غير معتمدة تماماً على بعضها البعض . والتذبذب في N أقل من $\sqrt{N}$ بحوالي الجذر التربيعي لمعامل فانو (F) Fano Factor ($\sqrt{F}$) والذي له قيمة أقل من واحد . أي أن :

$$\Delta E = \varepsilon\sqrt{FN} \qquad (6-8)$$

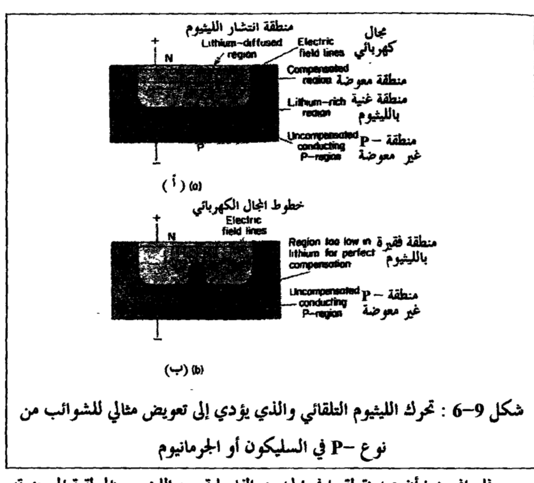
$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\frac{F\varepsilon}{E}} \qquad (6-9)$$

أما قيمة F للسليكون فتساوي حوالي 0.15 ، وأن أفضل عرض قمة يمكن الحصول عليه في الكشف عن 50 MeV من أيونات الهيليوم في عداد السليكون حوالي 5.2 KeV أو 0.0104٪ من طاقة أيون الهيليوم . ونظراً لوجود عدة مؤثرات صغيرة في السليكون بالإضافة إلى الضجيج في النظام الإلكتروني فإنه من الصعب الحصول على عرض قمة صغير جداً 0.0104٪ ، والقيمة التي يتم الحصول عليها عملياً 0.04٪ .

تمتاز عدادات السليكون والجرمانيوم بالسرعة العالية وباستبانة الطاقة الممتازة وبالتناسب الدقيق لحجم النبضة مع الطاقة المفقودة من قبل الدقيقة في المنطقة المستفذة .

وهذا لا ينطبق على الدقائق التي تسير ببطء كنواتج الانشطار وتحمل شحنة عالية وذلك لإنتاجها كثافة عالية من الإلكترونات والثقوب بالقرب من نهاية المدى ، ويحدث أن يتوحد بعضها مرة أخرى قبل أن تتجمع الشحنات مما يؤدي إلى نبضة صغيرة .

تبين المعادلة (3–6) أو (4–6) إمكانية زيادة سمك الطبقة المستنفذة إلى ما لا نهاية من خلال الزيادة في جهد الاستقطاب العكسي . أما واقع الأمر فيقول بعدم إمكانية استخدام جهد أعلى من 1000 ڤولت . وإذا تعدينا هذه القيمة نجم عن ذلك عطب كهربائي وازداد الضجيج كثيراً في العداد وانخفضت قيمة استبانة الطاقة عن القيمة المحسوبة من المعادلة (9–6) . ويمكن زيادة سمك الطبقة المستنفذة عن ما سبق من خلال بناء العداد من السليكون أو الجرمانيوم المحتوي على تركيز أقل من N_P (أكثر نقاوة) . ويصل الحد الأعلى للطبقة المستنفذة في المواد التجارية إلى 1 أو 2ملم . ولدى الطبقة المستنفذة التي يصل سمكها إلى 2ملم في السليكون القدرة على إيقاف البروتونات حتى 18 MeV . وهناك طريقة فنية تسمح بتقليص N_P إلى الصفر وتستخدم الليثيوم كعنصر مانح بدلاً من الفسفور . وذلك من خلال تبخير كمية صغيرة من الليثيوم على سطح السليكون أو الجرمانيوم من النوع –P. ومن ثم يسخن العداد من أجل أن ينتشر الليثيوم في السطح إلى عمق 0.1 ملم تقريباً . فيصبح العداد صمام ثنائي ويمكن إخضاعه إلى استقطاب عكسي ينجم عنه مجال كهربائي بين السطح الأمامي والخلفي ، فيكون السطح الغني بالليثيوم موجب والآخر سالب . وتتحرك أيونات الليثيوم ببطء عند درجة حرارة 100°م في السليكون و 40°م في الجرمانيوم من الجانب الموجب إلى الجانب السالب معوضة تماماً الذرات المستقبلة في المادة من النوع –P . ويمتاز التعويض الدقيق بخاصية التنظيم أو الضبط الذاتي .



شكل 9–6 : تحرك الليثيوم التلقائي والذي يؤدي إلى تعويض مثالي للشوائب من نوع P– في السليكون أو الجرمانيوم

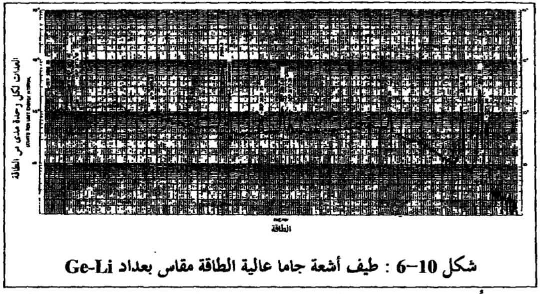
فلو افترضنا أن عند نقطة ما في الحدود الفاصلة بين الليثيوم (المنطقة المعوضة) والمادة غير المعوضة من النوع P– ، تكونت منطقة غنية جداً بالليثيوم كما في الشكل (أ9–6) شحنتها موجبة قليلاً بالمقارنة مع المادة من النوع P– في الشكل (8–6) . ولهذا فإن لأيونات الليثيوم قابلية عالية على التحرك من المنطقة الغنية والعكس صحيح إلى أن ينقص تركيز الليثيوم إلى القيمة المناسبة ، أي أن شدة المجال الكهربائي خلف المنطقة الغنية بالليثيوم أقل قليلاً من المناطق الباقية ويستدل على ذلك من الكثافة القليلة لخطوط المجال الكهربائي كما في الشكل (أ9–6) . وأما إذا كونت الحدود منطقة لا تحتوي على العدد الكافي من الليثيوم من أجل التعويض التام ازدادت قوة المجال الكهربائي عند تلك النقطة كما في الشكل (ب9–6) وهذا سيؤدي إلى التحرك السريع

لأيونات الليثيوم نحو المنطقة الفقيرة بالليثيوم إلى أن يتم التعويض التام .

ويمكن الحصول على مناطق تعويض بسمك يصل إلى عدة سنتيمترات نتيجة لتحرك الليثيوم ولم يتم تصنيع عدادات سليكون سمكها أكثر من 1سم . وذلك لارتباط السمك مع جهد الاستقطاب العكسي والذي يزداد مع ازدياد السمك والحد المعمول به حوالي 1000 ڤولت تشكل الحد الأعلى لعدادات سليكون من سمك 1سم أو أقل إذا احتجنا إلى استبانة طاقة جيدة .

تتحرك الثقوب والإلكترونات في الجرمانيوم بسرعة تساوي ثلاث أضعاف السرعة في السليكون مما يعني إمكانية استخدام طبقات التعويض السميكة . وتصنع عدادات أشعة جاما بحجم تعويضي قد يصل إلى 50سم^3 . وللجرمانيوم فعالية أعلى من السليكون في الكشف عن أشعة جاما وذلك لكبر عدده الذري وذلك لأن الامتصاص الكهرضوئي يزداد مع Z^5 لمادة الماص (الفصل الخامس 2–4–5) ويبين الشكل (10–6) طيف جاما من تحلل ^{56}Co بعداد جرمانيوم–ليثيوم . وتنتج القمم الحادة عن الامتصاص الكامل لطاقة الفوتون من خلال الامتصاص الكهرضوئي أو تشتت كمبتون المتبوع بالامتصاص الكهرضوئي للفوتون المتشتت . وتنجم الخلفية المستمرة في أسفل القمم عن الفوتونات التي تخسر جزء من طاقتها من خلال تشتت كمبتون . وقد تفر فوتونات كمبتون المتشتتة وخاصة إذا استخدم عداد بحجم صغير ، مما يعني أن جزء من طاقة الفوتون الساقط سوف تفقد في العداد . وفي حال كانت أشعة جاما الساقطة أكثر من 1.02 MeV ظهرت إمكانية الامتصاص بإنتاج الأزواج (الزوج) ، كما يبطء الإلكترون والبزوترون أكثر في الجرمانيوم ومن ثم يباد البزوترون (ارجع إلى 5–4–5) بالكترون منتجاً فوتونين طاقة كل منهما 0.511 MeV . وإذا تم امتصاص الفوتونات في العداد حصلنا على نبضة مساوية

لطاقة أشعة جاما الكاملة . وأما إذا امتص أحدهما وفر الآخر حصلنا على نبضة تساوي $(E_\gamma - 0.511)$ MeV وإذا فر كلاهما حصلنا على نبضة تساوي $(E_\gamma - 1.022)$ MeV وتؤدي هذه العمليات إلى إنتاج قمم هروب تابعة أحادية وثنائية (يرمز لهما DEP , SEP) عند 0.511 MeV و 1.022 MeV على التوالي تحت قمة أشعة جاما ذات الطاقة الكاملة ($E\gamma > 1.022$ MeV) .



شكل 10–6 : طيف أشعة جاما عالية الطاقة مقاس بعداد Ge-Li

وتُحسن استبانة الطاقة لكل من عدادات السليكون والجرمانيوم بالتبريد لكل منهما . فالليثيوم يتحرك بسهولة في شبكة الجرمانيوم وإذا اكتملت عملية التحرك وجب إبقاء العداد بارداً بما لا يقل عن حرارة الثلج الجاف وذلك لمنع الانتشار الحراري لليثيوم بحيث لا يفسد التعويض في العداد . وتظهر عدادات الليثيوم والجرمانيوم ذات التعويض التام تياراً صغيراً عند جهد الاستقطاب العكسي . ويؤدي التهيج الحراري في الشبكة إلى انتقال بعض الإلكترونات إلى حزمة التوصيل وخاصة في الجرمانيوم وذلك لقلة الفرق في الطاقة 0.67 eV بين حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ . وينتج عن التذبذب الإحصائي السريع للتيار المتسرب ضجيج

كهربائي يقلل من قوة استبانة الطاقة للعداد . ويمكن التقليل من انتقال الإلكترونات الحراري إلى حد كبير من خلال التبريد للعداد . فتعمل عدادات السليكون في المدى من 25-°م إلى 196-°م (غليان النيتروجين السائل) وعدادات الجرمانيوم عند 196-°م . ويؤدي التبريد إلى التقليل من التيار المتسرب وإلى الزيادة في حركة حاملي التيار فتتجمع الشحنة الناتجة عن الدقيقة بسرعة أعلى .

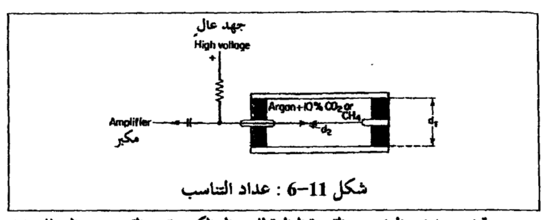
6-4 عدادات التناسب Proportional Counters

تقوم عدادات التناسب بوظيفتين : أولهما الكشف عن الدقائق وثانيهما التكبير . وتستخدم هذه العدادات في الكشف عن إشعاعات بيتا وجاما .

فإذا صُنع القطب المجمع للإلكترونات في العدادات المعبئة بالغاز من سلك رفيع قطره 0.001 بوصة ، كان المجال الكهربائي القريب من السلك عالٍ جداً (انظر الشكل 11-6) وتقدر قوة المجال الكهربائي E على مسافة r من السلك باستخدام المعادلة التالية (10-6) .

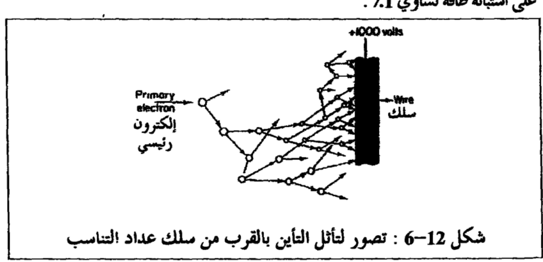
$$E = \frac{V}{r \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)} \qquad \frac{\text{فولت}}{\text{سم}} \qquad (6-10)$$

حيث ترمز V لجهد السلك المركزي الموجب بالنسبة للاسطوانة الخارجية و d_1 و d_2 لقطر العداد والسلك على التوالي . فكلما قلت المسافة r كلما ازداد المجال الكهربائي E ، ويحدد قطر السلك أصغر قيمة محتلمة لـ r . كما تصل قوة المجال الكهربائي إلى أعلى قيمة لها مباشرة خارج السلك الرفيع وعلى الرغم من ذلك فإن الأسلاك السميكة تعطي قيم أعلى للمجال الكهربائي E عند قيمة ثابتة للمسافة r .

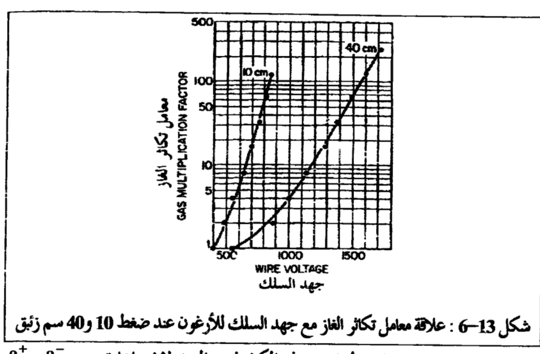


شكل 11–6 : عداد التناسب

وتمتاز عدادات التناسب بالقيمة العالية للمجال الكهربائي بالقرب من السلك مما يكسب الإلكترونات المتجهة نحو السلك تسارع كافي بين الاصطدامات فتستطيع تأيين جزيئات الغاز . وقد يتسبب إلكترون واحد بسيل من الأيونات (تأثُّل) كما هو مبين في الشكل (12–6) . ويحدث معظم التأثل (avalanche) بالقرب من السلك وذلك لارتفاع المجال الكهربائي هناك . وتسمى هذه العملية بتكاثر الغاز (gas multiplication) . ويتناسب مقدار النبضة الخارجة مع عدد الإلكترونات الرئيسية ومع الطاقة المفقودة من الدقيقة ومع معامل تكاثر الغاز (gas multiplication factor) ويعتمد معامل تكاثر الغاز على جهد السلك العالي V كما هو موضح في الشكل (13–6) . ونحتاج لقياس الطاقة الدقيقة في عداد التناسب إلى جهد عالٍ ثابت جداً وذلك لتثبت قيمة ثابت تكاثر الغاز ، علماً بإمكانية الحصول على استبانة طاقة تساوي 1٪ .

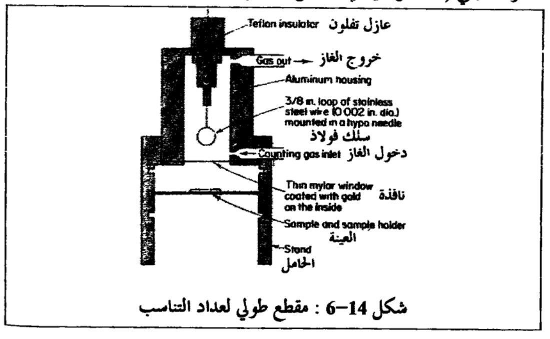


شكل 12–6 : تصور لتأثل التأين بالقرب من سلك عداد التناسب

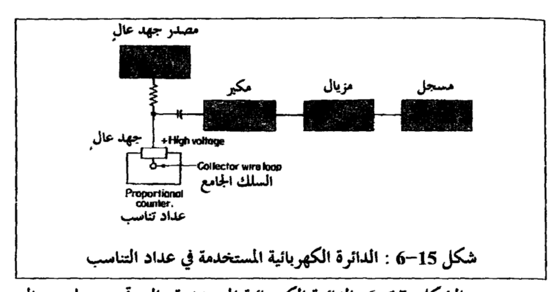


شكل 13–6 : علاقة معامل تكاثر الغاز مع جهد السلك للأرغون عند ضغط 10 و40 سم زئبق

وتستخدم عدادات التناسب في الكشف والعد لإشعاعات α ، β^- ، β^+ و E.C الناتجة عن التحللات بغض النظر عن طاقة كل منهم . ويتم ذلك بوضع العينة في داخل العداد وسحب الهواء من خلال الجريان المستمر لغاز كالميثان أو الغاز الطبيعي (كما هو مبين في الشكل 14–6) .

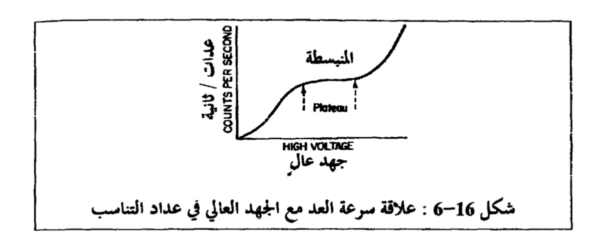


شكل 14–6 : مقطع طولي لعداد التناسب



شكل 15-6 : الدائرة الكهربائية المستخدمة في عداد التناسب

ويبين الشكل (15-6) الدائرة الكهربائية المستخدمة والتي تحتوي على مزيال يزيل النبضات التي لا تتعدى جهد معين يمكن تعديله ، أي أنه يرفض النبضات الصغيرة جداً والناجمة عن الضجيج في المكبر ، وهناك أيضاً عداد ومسجل يسجلان عدد النبضات التي تصل . وبما أن للعداد القدرة على كشف ما يقرب من 10^5 دقيقة/ثانية استخدم المسجل الإلكتروني بدل الميكانيكي البطيء . ويمكن للمسجل الإلكتروني أن يسجل 999 نبضة ثم يعود للصفر عند وصول النبضة الألف فيرسل نبضة إلى المسجل الميكانيكي الذي يسجل عدد الآلاف التي وصلت . وإذا كانت عيارات المزيال ثابتة وكسب المكبر ثابتة تغيرت سرعة العد كلما ازداد الجهد العالي، كما هو مبين في الشكل (16-6) . ولا تعتمد سرعة العد في المنطقة المنبسطة plateau على قيمة الجهد العالي وذلك لأنه ينتج عن كل دقيقة داخلة إلى العداد نبضة كبيرة تتعدى المزيال . وأما إذا ازداد الجهد ازدادت سرعة العد مرة أخرى بسبب التأثيرات المختلفة التي تنتج عدات مزيفة .

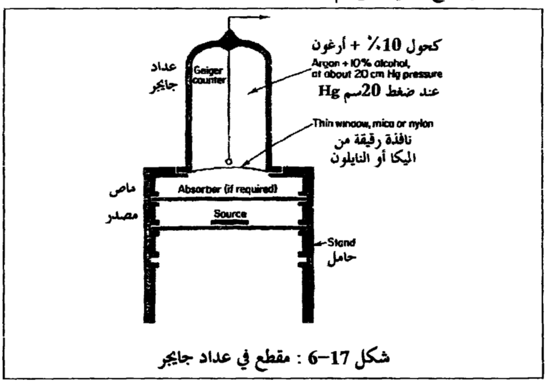


شكل 16–6 : علاقة سرعة العد مع الجهد العالي في عداد التناسب

6-5 عدادات جايجر Geiger Counters

تعتبر عدادات جايجر من أقدم الأجهزة المستخدمة في العد وأقلها إرضاءً . وهناك أوجه شبه كثيرة بين عدادات جايجر وعدادات التناسب والاختلاف الرئيسي هو في المجال الكهربائي القريب من السلك ذو القيمة العالية مما يؤدي إلى انتشار التأثل للإلكترونات وللأيونات الموجبة فوق السلك كله وإنتاج نبضة ما بين 20–100 ڤولت . ولابد من اتخاذ بعض الاحتياطات لمنع تحول التأثل إلى تفريغ كهربائي مستمر . وإذا عادت الأيونات الموجبة واتحدت مع الإلكترونات كما هو متوقع ستنطلق الفوتونات التي قد تصطدم مع جدران العداد مطلقة إلكترونات ضوئية تتسبب بالتأثل من جديد . ويمكن التقليل من هذا التأثير من خلال إضافة غاز متعدد الذرات أو بخار إلى الأرغون ، والمخاليط المستخدمة هي 90٪ Ar + 10٪ كحول إثيلي أو أرغون مع ضغط 0.20 ملم Hg من الكلورين . فتأخذ أيونات الأرغون الموجبة الإلكترونات من جزيئات الكحول لتعادل شحنتها ، بعد ذلك تتحرك أيونات الكحول ببطء مبتعدة عن السلك ونحو حائط العداد لتتحد مع الإلكترونات من الحائط فينتج عن ذلك طاقة الاتحاد الكافية لتحليل الكحول بدلاً من انطلاق إلكترونات جديدة . وبهذه الطريقة يمنع التأثل من التواصل

الذاتي. وعيب عداد جايجر بطئه الكبير بالمقارنة مع عـداد التناسب ، فبعد الكشف عن الدقيقة يحاط السلك كله بطبقة من الأيونات الموجبة التي تقلل من قوة المجال الكهربائي . وقد يؤدي هذا لعدم الكشف عن أي دقيقة تصل السلك قبل رحيل الأيونات الموجبة مبتعدة عنه ، وتحتاج هذه العملية لحوالي 10^{-3} ثانية . كما أنه من غير المريح وضع المصدر المشع في داخل العداد ، علماً بأن دخول الدقائق يتم من خلال نافذة رقيقة من المايكا أو النايلون (الشكل 17-6) . ويحتوي الحامل في الشكل (17-6) على عدة رفوف لدعم أو سد المصدر المشع أو أي ماص يتم استخدامه .



شكل 17-6 : مقطع في عداد جايجر

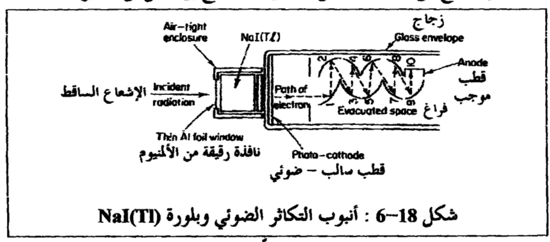
ويمتاز عداد جايجر بإنتاجه لنبضة كبيرة تحتاج للقليل من التكبير ولا يعتمد حجم النبضة على طبيعة الإشعاع الساقط . وتعتبر عدادات جايجر من العدادات البسيطة والرخيصة الثمن ولهذا تستخدم كأجهزة متنقلة في مسح المختبرات للكشف عن التلوثات الإشعاعية وفي التنقيب عن المعادن .

6-6 عدادات الوميض Scintillation Counters

تصنف العدادات المملوءة بالغاز على أنها غير حساسة لأشعة إكس وجاما ، وذلك لأن احتمالية إنتاج إلكترون من فوتون ذو طاقة عالية في داخل العداد قليلة جداً . وعلى الرغم من أن العدادات شبه الموصلة وخاصة الجرمانيوم ذات فعالية عالية واستبانة طاقة ممتازة إلا أنه لا يمكن تصنيعها بحجوم كبيرة جداً . ولقد وجد العلماء أن عداد وميض يوديد الصوديوم (NaI) ذا فعالية عالية في إيقاف أشعة جاما ذات الطاقة العالية ، كما يمكن تصنيعها بحجوم أكبر من عدادات الجرمانيوم وتمتاز باحتوائها على عنصر اليود الذي له عدد ذري أكبر من الجرمانيوم . إلا أنها ذات استبانة طاقة رديئة . ولهذا فإن عدادات وميض يوديد الصوديوم مستخدمة في الحالات التي تستدعي فعالية عالية في الكشف .

يتكون العداد من بلورة واحدة من NaI تنما من الملح المصهور . وقد يصل قطرها إلى 10 بوصات وطولها أيضاً ، إلا أن البلورات الصغيرة هي المستخدمة . ويحتوي يوديد الصوديوم على حوالي 0.5 مول٪ من يوديم الثاليوم المنشط . وتؤدي الإشعاعات المؤينة إلى انطلاق وميض قصير من الضوء طول موجته ما بين A° 3300-5000 . ويتم الكشف عن وميض الضوء بواسطة أنابيب التكاثر الضوئي التي تعطي نبضات كهربائية سعتها عدة فولتات . ويبين الشكل (6–18) جميع التفاصيل ، وبما أن بلورة يوديد الصوديوم عاشقة جداً للماء وجب وضعها في علبة محكمة الإغلاق لا تسمح بدخول الهواء ولها طاقة دخول رقيقة من الألمنيوم سمكها 0.001 بوصة . ويمر الضوء المنطلق في البلورة عبر طاقة شفافة في خلف البلورة إلى أنبوب التكاثر الضوئي . كما تطلى جدران العلبة الداخلية بأكسيد المغنيسيوم الذي يقوم بوظيفة عاكس للضوء . وتثبت العلبة على مقدمة الأنبوب بطبقة رقيقة وشفافة من الزيت أو الشحم وظيفتها التوصيل الضوئي الجيد والتقليل من الاحتكاكات الداخلية .

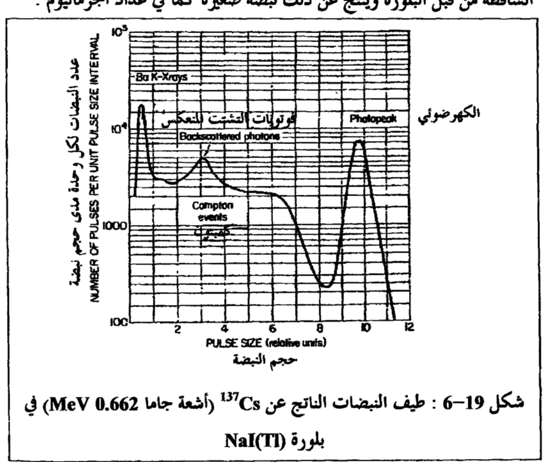
ويتكون سطح الكاثود الضوئي في أنبوب التكاثر الضوئي من صفيحة شبه شفافة من سبيكة الأنتموني والسيزيوم تطلق إلكترونات ضوئية بفعالية عالية عندما تصطدم بها الفوتونات من بلورة يوديد الصوديوم . وتتسارع هذه الإلكترونات نحو القطب الموجب (الأنود) رقم واحد (1) . ويصنع سطح القطب الموجب من صفيحة من الأنتموني والسيزيوم أو من المغنيسيوم والفضة . ولهذه الصفائح قدرة عالية على إطلاق عدة إلكترونات ذات طاقة قليلة مقابل كل إلكترون يسقط عليها . ويتبع هذا تسارع الإلكترونات الثانوية نحو الأنود الثاني الذي له جهد موجب أعلى وتتكرر هذه العملية . أي أن عدد الإلكترونات الواصل للأنود الأخير يفوق بكثير عدد الإلكترونات الأصلي . فعلى سبيل المثال : إذا كان عدد الإلكترونات المنطلقة من كل أنود n ضعف عدد الإلكترونات الساقطة وكان هناك تسع مراحل في الأنبوب ، تكاثرت الإلكترونات بـ n^9 ، وإذا كانت $n = 4$ ، فإن عدد الإلكترونات الكلي في النهاية 2.6×10^5 . وكأن أنبوب التكاثر الضوئي مكبر له كسب عالٍ جداً . ويتأثر الكسب كثيراً بالجهد المطبق في الأقطاب الموجبة لاعتماد التكاثر على الجهد ، فقد لا يحدث أو يكون قليلاً إذا لم تتسارع الإلكترونات بما فيه الكفاية من مرحلة إلى أخرى . وإذا استخدم جهد كلي يساوي 2000 ڤولت نتج عن ذلك نبضات من عدة ڤولتات تحتاج إلى القليل من التكبير .



شكل 18–6 : أنبوب التكاثر الضوئي وبلورة NaI(Tl)

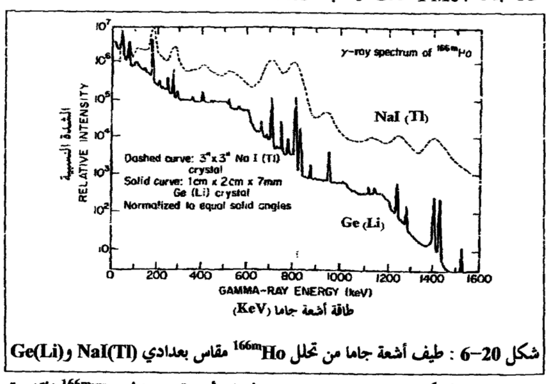
ويتناسب حجم النبضة الخارجة طردياً مع الطاقة المفقودة من قبل الدقيقة

الساقطة ، ولهذا تستخدم بلورات NaI (Tl) في قياس طاقة الدقائق وفي الكشف عنها . وقد تبلغ سرعة العد 10^5/ثانية لأن وميض الضوء يتم في وقت قصير جداً بعد وصول الإشعاع . ويستخدم عداد NaI (Tl) كثيراً في دراسة طيف أشعة جاما لأن له قدرة إيقاف عالية ومهمة . وينجم عن تفاعل أشعة جاما مع البلورة إلكترونات سريعة . وإذا كانت البلورة كبيرة بما فيه الكفاية امتصت هذه الإلكترونات منتجة وميض من الضوء . وأما إذا أدى التفاعل الرئيسي إلى إنتاج إلكترونات ضوئية فإن طاقة أشعة جاما الكاملة سيتم امتصاصها . وفي حال نجم الإلكترون الرئيسي عن تشتت كمبتون فلن يكون لديه الطاقة الكاملة لأشعة جاما. وغالباً ما تهرب أشعة جاما المتشتتة من البلورة فيتم امتصاص جزء من الأشعة الساقطة من قبل البلورة وينتج عن ذلك نبضة صغيرة كما في عداد الجرمانيوم .



شكل 19–6 : طيف النبضات الناتج عن ^{137}Cs (أشعة جاما 0.662 MeV) في بلورة NaI(Tl)

ويبين الشكل (6–19) طيف النبضات الناتجة من إشعاعات جاما في ^{137}Cs . وتتكون أكبر هذه النبضات من الامتصاص الكهرضوئي وتستخدم هذه القمة في قياس طاقة أشعة جاما . وتؤدي تأثيرات كمبتون إلى توزيع منبسط فوق قمة صغيرة ومصدرها أشعة جاما المتشتتة من حجاب الرصاص المحيط بالعداد . كما تظهر قمة في منطقة النبضات ذات الحجم القليل مصدرها أشعة K_x إكس للباريوم الناتج من تحلل ^{137}Cs . ويزداد حجم القمة الضوئية كلما ازداد حجم البلورة لازدياد فرص التفاعل ما بين أشعة جاما كمبتون المتشتتة والبلورة مرة ثانية وبحيث تفقد طاقتها الباقية قبل أن تهرب من البلورة . وتتناسب استبانة الطاقة (عرض القمة الضوئية عند منتصف الارتفاع) عكسياً مع الجذر التربيعي لطاقة أشعة جاما . فإذا كانت طاقة جاما 1 MeV كانت الاستبانة 8٪ .



شكل 20–6 : طيف أشعة جاما من تحلل ^{166m}Ho مقاس بعدادي NaI(Tl) وGe(Li)

ويبين الشكل (6–20) مقارنة ما بين طيف أشعة جاما لـ ^{166m}Ho المقاسة

بعدادي NaI و Ge من نفس الحجم . ونلاحظ أن استبانة الطاقـة للقمـم الضوئيـة أفضل بكثير في عداد Ge . وقد تم توحيد المنحنيـين مـن العدادين للحصـول على نفس الرقم من الأحداث عند نفس الفعالية . وفي واقع الأمر يسجل عداد NaI ما بين 10 إلى مئة ضعف من الأحداث بالمقارنة مع Ge وذلك لأنه يحتـوي على اليـود الذي له عدد ذري أعلى مما يجعل منه ماص فعال لأشعة جاما .

ونظراً لقصر زمن وميض الضوء في البلورات العضوية كالسـتلبين Stilbene والأنثراسين Anthracene بالمقارنة مع NaI (Tl) ، استخدمت هذه البلـورات في الكشف عن الدقائق المشـحونة وفي العـد خاصـة عندمـا نحتـاج إلى سـرعة عاليـة في العد. ويقدر زمن وميض الضوء فيها بحوالي 10^{-8} ثانيـة . ولا يمكـن اسـتخدامها في قيـاس أشـعة جاما لاحتوائها علـى عنـاصر خفيفـة مثـل الكربـون والهيدروجـين . ويتناسب الضوء الناتج مع الطاقة المفقودة من الدقيقة المؤينة في حـال كـانت كثافـة التأين قليلة بما فيه الكفاية . وتستخدم البلورات العضوية عند الكشف عن الدقـائق في التجارب وخاصة عندما تكون الاستجابة السريعة أهم من استبانة الطاقة الجيدة. كما أن استخدامها في قياس الطاقة الكلية للدقائق الثقيلة محـدود لأن كثافـة التـأين عالية جداً لتعطي نبضة تتناسب بدقة مع الطاقة إلا إذا كانت سـرعة الدقيقـة عاليـة جداً ($100\ MeV < \nu_P$) . عند ذلك تمر الدقيقة عبر بلورة من الحجم العملي ويتـم قياس الطاقة المفقودة بدلاً من الطاقة الكلية .

ويمكن استخدام المواد العضوية المطلقة للوميض في المواد البلاستيكية الشفافة المصنعة بأشكال مختلفة . كما يمكن إذابتهـا في السـوائل العضويـة فتعطي كواشـف ذات أحجام كبيرة . وقد استخدمت هذه المحاليل في الكشف عن النيوترينو .

الأسئلة :

1) احسب كمية الشحنة السالبة بالكولوم الناتجة عن إيقاف 10 MeV ديوترون في السليكون . وإذا مرت هذه الشحنة بسرعة ثابتة في مقاومة 10^6 أوم وبزمن 1 μsec ، فما هو الجهد المتولد .

2) إذا كانت الطبقة المستنفذة في كاشف السليكون سميكة بما فيه الكفاية لإيقاف 10 MeV أيونات هيليوم وكان جهد الاستقطاب 50 ڤولت ، فاحسب سمك الطبقة الكافي لإيقاف 15 MeV أيونات هيليوم . افترض أن العلاقة ما بين الطاقة والمدى للسليكون مساوية للألمنيوم وأن سمك الطبقة في الجانب المانح من الوصلة قليل جداً .

3) احسب للكاشف في السؤال (2) ارتفاع النبضة الناتجة عن 10 MeV بروتون بالمقارنة مع النبضة الناتجة عن 10 MeV أيون هيليوم عندما يكون جهد الاستقطاب 75 ڤولت .

4) ارسم للكاشف في السؤال (3) العلاقة ما بين ارتفاع النبضة النسبي لأيونات الهيليوم مع طاقة هذه الأيونات من 1 eV إلى 14 MeV علماً بأن جهد الاستقطاب 50 ڤولت .

الفصل السابع

استخدامات النظائر المشعة في الكيمياء

RADIOCHEMICAL APPLICATIONS

7-1 مقدمة

تستخدم النظائر المشعة في الوقت الحاضر من قبل العديد من العلماء في أبحاثهم ودراساتهم أكانوا علماء نوويون أم لا . وتعتبر ظاهرة النشاط الإشعاعي لغير النوويين أداة تساعدهم في أبحاثهم كمطياف الكتلة أو جهاز قياس درجة الحموضة . ويستخدم العلماء النوويون الأساليب الكيميائية في دراسة الظواهر النووية وأما الكيميائيون الإشعاعيون فيستخدمون الأساليب النووية في دراسة الظواهر الكيميائية . سندرس في هذا الفصل الطرق التي تم استخدام الكيمياء الإشعاعية فيها لدعم البحث في شتى مجالات الكيمياء والعلوم التي تتصل فيها .

في عام 1913 قام العالمان جـ.دي. هيفزي و ف.بانيث بتجربة للدراسة ذائبية أحد أملاح الرصاص مستخدمين أحد نظائر الرصاص المشعة والموجودة في الطبيعة وبتركيز شحيح . وبعد اكتشاف النظائر المصنعة ، قام العالمان دي. هيفزي و أو.شسويتز بتحضير ^{32}P المشع واستخدامه بتركيز شحيح في الدراسات البيولوجية (الحياتية) .

وفي نفس العام أجرى دي. هيفزي وآخرون أول تحليل بالتنشيط (تنشيطي) على العناصر النادرة . وعلى الرغم من أهمية استخدام العناصر المشعة بتركيز شحيح إلا أنها لم تستخدم على نطاق واسع إلا بعد الحرب العالمية الثانية لتوفر كميات كبيرة من العناصر المشعة من المفاعلات النووية .

إن استخدام النظائر المشعة في الدراسات أقل ثمناً وأسهل من استخدام النظائر المستقرة غير المشعة . نظراً لحاجة النظائر المستقرة إلى أجهزة مكلفة الثمن مثل جهاز مطياف الكتلة وجهاز الرنين المغناطيسي وغيرها .

7-2 الافتراضات الأساسية لاستخدام النظائر المشعة بتركيز شحيح

Basic Assumptions for Tracer Use

هناك بعض التجارب التي لا يمكن الحصول منها على نتائج علمية إلا باستخدام العناصر المشعة الشحيحة لنستدل منها على وجود وتركيز عناصر أو مركبات معينة في مكان معين وزمن محدد . ومن الأمثلة على ذلك دراسة انتشار أيونات معدن في محاليل أملاح ذلك المعدن .

أما الافتراض الأول فهو أن للنظائر المشعة والمستقرة لعنصر ما نفس الخواص الكيميائية ، فإذا استبدلنا ^{12}C بـ ^{14}C في مركب للكربون فلن تتغير نوعية وقوة الروابط الكيميائية ولن تتأثر الخواص الفيزيائية لذلك المركب . وتعتمد صحة هذا الافتراض على دقة قياس الخواص الفيزيائية والكيميائية . وقد تتأثر هذه الخواص بالفروق في الكتلة بين النظائر ، وفي حال ^{14}C و ^{12}C فإن الفرق في الكتلة حوالي 15٪ ، ولهذا فإن تأثير النظير **Isotope Effect** قليل ومن الصعب الكشف عنه ، وفي العناصر الثقيلة يهمل تماماً ، ولا يأخذ تأثير النظير بعين الاعتبار إلا في الحالات التي يستبدل فيها الهيدروجين –الديوتيريوم– والتريتيوم .

وأما الافتراض الثاني فهو عدم تأثر الخواص الكيميائية والفيزيائية للنظير بطبيعته المشعة . فلا يمكن التمييز بين ذرة النظير المشع والمستقر إلا من خلال كتلة النظير ، وعندما تتحلل ذرة النظير المشع ويتم عدها ينتج عنصر جديد له خواص كيميائية خاصة به . وفي حال كانت سرعة التحلل عالية جداً ظهرت إمكانية حدوث تأثيرات إشعاعية ثانوية بسبب طاقة التحلل الإشعاعي المنطلقة . ويستخدم في التجارب مستوى عالي من النشاط الإشعاعي ليعطي نتائج دقيقة ولا يؤدي إلى تأثيرات إشعاعية ملحوظة .

وعلى الرغم من الافتراض القائل بعدم تأثر الأنظمة الكيميائية بالنشاط

الإشعاعي للنظائر وجب علينا أن نعطي العلاقة بين الأب والإبنة في النوى المشعة عناية خاصة . فعلى سبيل المثال Sr و Y عنصران مختلفان كيميائياً ، وإذا أخذنا عينة من ^{90}Sr وقسنا عدد دقائق β الكلي لها ، فإن هذه العينة تحتوي على ^{90}Sr وجزء مجهول من ^{90}Y المشع الناتج من تحلل ^{90}Sr الإشعاعي حسب العلاقة التالية.

^{90}Sr (β^- $t_{1/2}$ 29 سنة) → ^{90}Y (β^- $t_{1/2}$ 64 ساعة) → ^{90}Zr (مستقر)

ويستخدم قياس امتصاص β ووميض جاما والتي تعتمد على الفروق في الطاقة في دراسة هذا النوع من حالات الأب والإبنة . وإذا كان الاتزان بين نشاط الأب والإبنة سريع كان من الأبسط عد العينة بعد زمن كاف يسمح بالوصول إلى الاتزان . وفي حالة ^{90}Sr – ^{90}Y فإن الزمن الكافي للوصول إلى التزان هو 25 يوم. وإذا استخدمنا ^{137}Cs في دراسة كيمياء السيزيوم وجب علينا الانتظار من 15–20 دقيقة فقط مباشرة بعد الفصل لعد العينة وهذا الزمن كاف بحيث تصل الإبنة ^{137m}Ba ($t_{1/2}$ = 2.6 دقيقة) إلى مستوى الاتزان . وبما أن نسبة ^{137}Cs إلى ^{137}Ba ثابتة في جميع العينات عند الاتزان فإن سرعة العد الكلية قبل وبعد أي خطوة كيميائية هي المقياس الحقيقي لتصرف السيزيوم فقط . وفي حال لم يصل الاتزان الإشعاعي في وقت مناسب فإنه من الضروري أن نميز ضد النشاط الإشعاعي الذي لم يدخل في النظام الكيميائي أو نأخذ بعين الاعتبار إسهامه في سرعة العد الصافية.

وإذا اضطررنا لاستخدام نوى مشعة يمكن أن تتحلل بقدر كاف خلال العمليات الكيميائية وطلب منا أن نقارن بين النتائج عند نقاط مختلفة في التفاعل وجب علينا تصحيح كل نتائج العد إلى نفس النقطة في الزمن .

ومن فوائد استخدام النظائر المشعة بتركيز شحيح ما يلي :

أ) يمكن قياسها وكشفها بدقة عالية من 10^{-6} إلى 10^{-16} غم .

ب) لا يعتمد النشاط الإشعاعي على الضغط أو درجة الحرارة أو حالة المادة الكيميائية أو الفيزيائية .

جـ) لا تؤثر العناصر المشعة على النظام وتستخدم غالباً في الطرق أو العمليات غير الهدامة .

د) وإذا كان العنصر المشع الشحيح نقي كيميائياً وإشعاعياً فلن يكون هناك تداخل من العناصر الأخرى كما يحدث في التحاليل الكيميائية .

7-3 الكيمياء التحليلية Analytical Chemistry

7-3-1 طريقة تخفيف النظائر

Isotope Dilution Method

تستخدم هذه الطريقة عندما يكون هناك مخاليط معقدة من المركبات مثل تحضير المركبات العضوية وأنظمة الكيمياء الحيوية ويصعب فصل أو تحديد كمية مادة معينة . فيضاف كمية صغيرة نقية كيميائياً وإشعاعياً من تلك المادة إلى المخلوط المراد تحليله . وقد تكون هذه الكمية من عنصر أو مركب موسوم معروف النشاط النوعي له . وبعد التأكد من أن المادة المضافة قد خلطت جيداً مع مكونات الخليط السابق ، تفصل من الخليط كمية صغيرة نقية جداً من المادة المراد تحليلها ، ومن ثم توزن ويتم عدها أو قياس النشاط الإشعاعي لها لحساب نشاطها النوعي .

وتحسب كتلة المادة المرادة W_u في الخليط الأصلي من المعادلة التالية (7−1) :

$$W_u = \left(\frac{S_0}{S_m} - 1\right) W_0 \qquad (7-1)$$

حيث W_0 كتلة المادة المشعة المضافة و S_0 النشاط النوعي لها و S_m النشاط النوعي للعينة التي تم فصلها مقاساً بنفس الطريقة . ويعرف النشاط النوعي S بأنه حاصل قسمة النشاط الإشعاعي A على الكتلة W ، $S = \left(\frac{A}{W}\right)$ dps/غم (تحلل/ثانية/غم) .

ولنفترض للتمثيل ، أننا أضفنا 1.0 غم من KNO_3 يحتوي على كمية صغيرة من نظير البوتاسيوم المشع ^{40}K إلى مخلوط من KNO_3 و NaCl . فإذا فصلت كمية من KNO_3 بالتبلور التجزيئي ووجد أن النشاط النوعي للعينة المفصولة يساوي 1٪ من النشاط النوعي لعينة KNO_3 المحتوية على ^{40}K الذي أضيف في البدء ، فإن معنى ذلك أن 99٪ من النشاط النوعي قد بقي في المخلوط . وهذا يدل على أنه عند إضافة العينة الكاشفة ، كانت نسبتها إلى كمية KNO_3 التي لا يوجد فيها نظير مشع كنسبة 99:1. وبذلك فإن كمية KNO_3 في الخليط الأصلي تساوي 99غم . وتستخدم هذه الطريقة في الحالات التي يكون فيها الفصل الكمي غير ممكن ، كما في تقدير كميات الرصاص القليلة جداً بالترسيب الأنودي والتي أعطت نتائج مختلفة . فإذا أضفنا كمية معروفة من الرصاص المشع ومن ثم قسنا النشاط الإشعاعي للرصاص على الأنود ، استطعنا تقدير مردود الراسب بالرغم من عدم فعالية الترسيب الكهربائي .

وتستخدم هذه الطريقة في تقدير النافثالين في القار وفي تقدير كمية الأحماض الأمينية في المواد البيولوجية .

وفي حال لم نجد نظير مشع لعنصر ما ، فإنه بالإمكان استخدام هذه الطريقة ولكن من خلال زيادة تركيز نظير مستقر وتحليل العينة بواسطة جهاز مطياف الكتلة . وقام كل من جـ. روزيكا و جـ. ستاري بتطوير طريقة للتحليل الإشعاعي مبنية على تخفيف النظائر ، فلنفترض أن هناك حاجة لتقدير كمية صغيرة من أيونات الفضة في محلول مائي (W_u) ، فيضاف كمية مساوية لـ W_u من النظير المشع ^{110}Ag (W_0) ، ومن ثم يستخلص الفضة بواسطة الديثيزون الذائب في الكلوروفورم ويحدد النشاط النوعي لهذا المحلول (S_m) . وفي نفس الوقت يتم الاستخلاص لعينة مرجعية بواسطة الديثيزون في الكلوروفوم تحتوي على W_0 من النظير المشع النقي لها نشاط نوعي (S_0). والشرط الوحيد في هذه التجربة أن لا تكون كمية الديثيزون كافية لاستخلاص كل

الفضة Substoichiometric ، وتستخدم المعادلة (1–7) في تحديد كمية W_u .

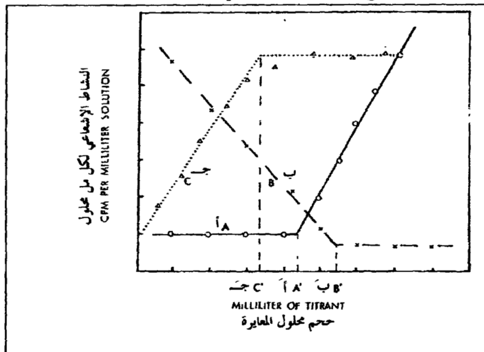
ومن التطبيقات الأخرى ما يسمى بالمسح المناعي Immunoassay والتي طورها روزلين يالو وتستخدم بشكل واسع في تحليل البروتين في المستشفيات . وتشتمل على الخطوات التالية : تضاف كتلة معروفة W_0 من البروتين الموسوم P^* ويسمح لها بالتفاعل مع كتلة أصغر بكثير من الجسم المضاد A مكونة المعقد PA . ومن ثم يتم فصله وتحديد نشاطه الإشعاعي R_0 . وفي نفس الوقت وتحت نفس الظروف يتم خلط كتلة مجهولة W_u من البروتين مع نفس الكمية W_0 من البروتين الموسوم ، ومن ثم يسمح لها بالتفاعل مع نفس الكمية من الجسم المضاد A لتكون المعقد P^*A الذي يفصل (كتلته W_m) ويقاس نشاطه الإشعاعي R_m .

وفي النهاية تحسب الكتلة المجهولة W_u من المعادلة (1–7) . وتستخدم هذه الطريقة في قياس حجم الدم في جسم الإنسان ، وذلك بحقن حجم معروف من نظير مشع ^{51}Cr، وبعد أن يختلط جيداً بالدم ، يؤخذ من دم الشخص حجم مساوٍ وتقاس فيه كمية النظير المشع ^{51}Cr، ومن الكميات المقاسة عن مستوى الإشعاع يحسب حجم الدم . وتستخدم أيضاً في قياس حجم الدم لبقية الحيوانات وفي قياس حجوم المياه الجوفية .

7-3-2 طريقة قياس الإشعاع Radiometric Method

وتشتمل هذه الطريقة كل عمليات قياس التركيز بواسطة النظائر المشعة الشحيحة . وأحد هذه العمليات هي عملية معايرة حالتين من المادة بوجود نظير مشع . ويستدل على نقطة النهاية من خلال اختفاء النظير المشع من إحدى الحالتين. ومن الممكن القيام بعملية تحليل سريعة لأنظمة غير عضوية وذلك بإضافة كمية فائضة قليلاً من محلول مشع إلى محلول مجهول مما يؤدي إلى الترسيب الكمي للمادة الأخيرة المجهولة . فلنفترض أن أحد ما رغب في تقدير تركيز Ag^+ في المحلول بواسطة المعايرة مع محلول NaI . فإذا احتوى محلول NaI على اليود المشع ظهر الإشعاع في الراسب AgI ولن تظهر الإشعاعات في المحلول إلا بعد أن تترسب كل

أيونات Ag^+ من المحلول . وإذا رسمنا العلاقة ما بين النشاط الإشعاعي المقاس للمحلول ضد حجم محلول المعايرة حصلنا على المنحنى (أ) A (شكل 1-7) . أما إذا كان تركيز اليوديد هو المجهول ، فنضيف اليود المشع بتركيز شحيح إلى محلول اليود الذي سيعاير لاحقاً مع أيونات Ag^+ وسنحصل على المنحنى (ب) B (شكل 1-7) . وفي كلا المنحنيين يمثل تقاطع المنحنى مع محور (س) نقطة النهاية في عملية المعايرة والتي تعطي مباشرة تركيز المحلول المجهول . وتستخدم هذه الطريقة في جميع حالات الترسيب الكمي .



شكل 1-7 : منحنيات المعايرة الإشعاعية

أ) إضافة $^{129}I^-$ المشع إلى محلول Ag^+ مجهول التركيز .

ب) إضافة Ag^+ غير المشع إلى محلول اليوديد المجهول ، والذي سيضاف إليه نظير اليود $^{129}I^-$ في البداية .

جـ) معايرة الطورين : يحتوي الطور المائي على تركيز مجهول من Fe^{2+} وعلى كمية شحيحة من ^{55}Fe ، ويحتوي الطور العضوي على الأوكزين في الكلوروفورم .

واستخدم بعض العلماء هذه الطريقة في الأنظمة التي تحتوي على سائل– سائل (طورين) ، كما في عملية تقدير تركيز Fe^{2+} في الماء ، والتي تتم من خلال إضافة كمية شحيحة من Fe^{2+} المشع إلى المحلول الذي تعدل درجة حموضته بعد ذلك إلى pH = 2.0 . ومن ثم يضاف حجم من الكلوروفورم إلى هذا المحلول فيصبح لدينا سائلين متلامسين ، بعد ذلك تبدأ عملية المعايرة لهذا النظام المتنوع مع محلول الأوكزين في الكلوروفورم . يتكون خلال المعايرة معقد الحديد–الأوكزين الذي يستخلص إلى السائل العضوي مباشرة حاملاً معه النشاط الإشعاعي . ويتبع النشاط الإشعاعي للمحلول المائي المنحنى (B) وللمحلول العضوي المنحنى (C) (شكل 1–7) . وإذا استخلص كل Fe^{2+} إلى السائل العضوي ، وصل النشاط الإشعاعي له إلى قيمة ثابتة لا تتأثر بإضافة المزيد من الأوكزين إلى النظام . وتسمح هذه الطريقة بتقدير كميات صغيرة جداً تصل إلى 10^{-8} جـ(M) وبخطأ لا يتعدى 2–3٪ وقد نستخدم الراتنج الموجب أو السالب في مكان المذيب العضوي ليقوم بعملية الاستخلاص . ولهذه الطريقة فائدة كبيرة في طرق التحليل العادية التي تواجه صعوبات بسبب طبيعة الراسب ، كما يمكن أن تتحول إلى طريقة آلية ذات فوائد عديدة .

7-3-3 طريقة التنشيط Activation Analysis

تتمتع طريقة التحليل بالتنشيط بحساسية عالية فهي غير هدامة وتستخدم في التقدير الوصفي والكمي للمكونات الذرية لأي عينة . فهي تمثل بديل بسيط وسهل لطرق التحليل الهدامة المعروفة ، ومن العينات التي يمكن دراسة مكوناتها الذرية بسهولة : خامات المعادن والعينات البيئية والبيولوجية والقطع الأثرية

وغيرها. وتحتاج هذه الطريقة إلى مصدر إشعاع قوي لا يمكن الاستغناء عنه .

وتستخدم في هذه الطريقة خواص التحلل الإشعاعي كنصف العُمر وطريقة التحلل وطاقة التحلل في التعرف على النوى الموجودة . وتتم هذه الطريقة من خلال تشعيع العينة لتتكون كمية R من النواة المشعة حسب العلاقة التالية :

$$R = \psi \phi \sigma N (1-e^{\lambda t_{irr}}) e^{-\lambda t_{cool}} \qquad (7-2)$$

(t_{cool} زمن التبريد و t_{irr} زمن التشعيع و N عدد ذرات العينة المقذوفة)

وتجري عملية التشعيع بواسطة فيض من الدقائق المتجانسة كما في النيوترونات في المفاعلات (التحليل بالتنشيط النيوتروني ، Neutron Activation Analysis NAA) ، وهي من أكثر الطرق شيوعاً .

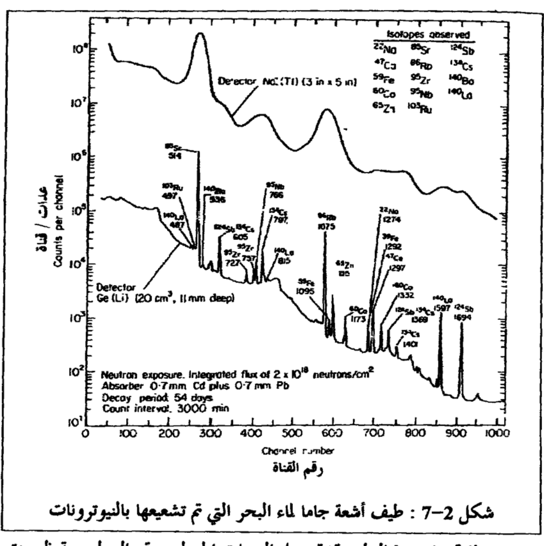
وترتبط أقل كمية من العنصر يمكن الكشف عنها مع حساسية جهاز القياس ψ وفيض الدقائق المقذوفة ϕ والمقطع المستعرض للتفاعل σ وزمن التشعيع t_{irr} (اللازم للوصول إلى حد الإشباع في النشاط) وثابت التحلل للنوى المشعة المتكونة λ . ويلخص الجدول (7-1) حدود الكشف في NAA .

وهناك بعض العناصر (كالعناصر الخفيفة) التي لها حساسية قليلة نحو القذف بالنيوترونات الحرارية ولهذا تستخدم النيوترونات السريعة (FNNA) أو الدقائق المشحونة (CPAA) في تشعيعها . فتتم عملية تحليل الأوكسجين بالتشعيع بنيوترونات طاقتها 14 MeV (σ = 37 mb) فينتج ^{16}N الذي يتحلل ($t_{1/2}$ = 7.3 ثانية) مطلقاً دقائق β وأشعة جاما (6-7 MeV) . ويبين الشكل (7-2) طيف NAA نموذجي تم الحصول عليه من جهاز متعدد

القنوات مرتبط بكاشف الوميض (المنحنى الأعلى) أو بكاشف الحالة الصلبة (المنحنى الأسفل) . ويمكن تحديد طاقة γ لكل قمة من أجل التعرف على كل نواة . وتتزامن هذه العملية مع التعرف بواسطة كواشف الحالة الصلبة فقط ، فكواشف الوميض NaI(Tl) لا تستطيع ذلك لضعف الاستبانة فيها .

حدود الكشف Limit of detection (μg)	العناصر Elements
$1-3\times10^{-6}$	Dy
$4-9\times10^{-6}$	Mn
$1-3\times10^{-5}$	Kr, Rh, In, Eu, Ho, Lu
$4-9\times10^{-5}$	V, Ag, Cs, Sm, Hf, Ir, Au
$1-3\times10^{-4}$	Sc, Br, Y, Ba, W, Re, Os, U
$4-9\times10^{-4}$	Na, Al, Cu, Ga, As, Sr, Pd, I, La, Er
$1-3\times10^{-3}$	Co, Ge, Nb, Ru, Cd, Sb, Te, Xe, Nd, Yb, Pt, Hg
$4-9\times10^{-3}$	Ar, Mo, Pr, Gd
$1-3\times10^{-2}$	Mg, Cl, Ti, Zn, Se, Sn, Ce, Tm, Ta, Th
$4-9\times10^{-2}$	K, Ni, Rb
$1-3\times10^{-1}$	F, Ne, Ca, Cr, Zr, Tb
10−30	Si, S, Fe

جدول 1−7 : حدود الكشف لواحد وسبعين عنصراً (فيض النيوترونات 10^{13} نيوترون/سم^2 ثانية ولمدة 1 ساعة) .



شكل 2–7 : طيف أشعة جاما لماء البحر التي تم تشعيعها بالنيوترونات

وإذا تم تشعيع مخاليط معقدة مثل العينات الجيولوجية والبيولوجية ظهرت صعوبات عدة في تحديد القمم والتعرف عليها . ولهذا تتم عملية مسح لطيف الطاقة على فترات زمنية لتحديد نصف العمر للقمة من خلال النقص في مساحة القمة مع الزمن . ومن التطبيقات المهمة لـ NAA تحليل المكونات الشحيحة التركيز لكل من الهواء والماء والتربة والعينات الجيولوجية والأنظمة البحرية والبيولوجية . كما يستخدم NAA في العلم الجنائي لقياس مكونات المواد التي تلتصق باليد التي تطلق النار وفي تحديد نوع الطلقات وعددها . وإذا تم تحليل المعادن الشحيحة في النباتات

كان بالإمكان تحديد الأماكن التي زرعت فيها كالمخدرات على سبيل المثـال . كمـا تلعب المكونات الشحيحة للقطع الأثرية والفنية في تحديد مكانها الأصلي وإطلاقها. فعلى سبيل المثال استطاع العلمـاء مـن خـلال NAA لمكونـات الدهـان المعدنيـة في اللوحة الهولندية المسماة بـ كرسـت ومـاجلدين "Christ and Magdalen" أن يثبتوا أنها قد رسمت في القرن العشرين وليس في القـرن السـادس عشـر أو السـابع عشر . وذلـك لأن تركـيز Ag أقـل مـن 7 ppm و Sb أقـل مـن 1.33 ppm في الدهان الأبيض الرصاصي بينما كان تركـيز Ag مـن 10–1000 ppm و Sb مـن 50–230 في الدهان الأبيض الرصاصي المأخوذ من اللوحات الهولنديـة المرسـومة في القرن السادس عشر أو السابع عشر .

يحتوي شعر الإنسان على كميات شحيحة من العناصر مثل Au , Ce , Na وCu بنسب متفاوتة من شخص إلى آخـر . ويمكـن اسـتخدام هـذه الظـاهرة في التعـرف على الأشخاص . ومن التطبيقات على هذا وجـود كميـة كبـيرة نسبياً مـن الزرنيـخ في شعر نابليون بونابرت مما يعني حصوله على جرعات كبيرة من الزرنيخ قبـل وفاتـه وأنـه كان هناك محاولة لقتله من قبل طباخـه العميـل للمملكـة المتحـدة (بريطانيـا العظمـى) . ونظراً لحساسية التحليل بالتنشيط العالية فلقد استخدم في دراسة التلوث البيئي .

7-3-4 التصوير الإشعاعي الآلي Autoradiography

تظهر هذه الطريقة توزيع عنصر أو مركب مشع في عينة ما للعين المجردة أو باسـتخدام الميكروسكوب وذلك من خلال تسويد أفلام التصوير نتيجة تعرضها للإشعاعات النووية .

وهناك عدة أمثلة تبين أهمية هذه الطريقة منها.

يعتبر الرصاص من الشـوائب غـير المرغـوب فيهـا في الفـولاذ حتـى لـو كـان

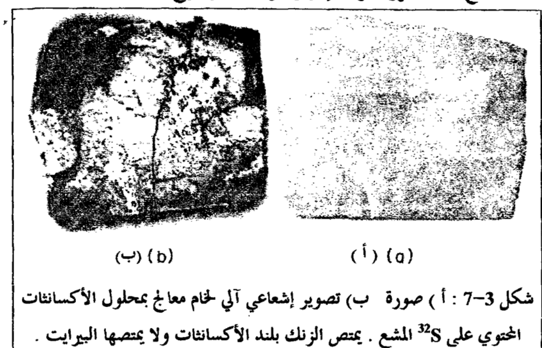
بكميات قليلة جداً . ومن أجل معرفة تأثير الرصاص على الفولاذ أضيفت كمية من ^{212}Pb لى مصهور الفولاذ ، وبعد تبريده يتم قطع سبيكة الفولاذ بالمنشار ومن ثم صقل سطحها المنبسط آلياً وخدشه في حوض التحليل الكهربائي ليعطي سطح منبسط جداً وبكر . بعد ذلك يضغط فلم التصوير وبقوة على سطح المعدن فيتعرض للإشعاعات من ^{212}Pb في مكان مظلم ولمدة أسبوع . وبعد تحميض الفلم تظهر المناطق المعتمة الأماكن التي يتواجد فيها الرصاص في سطح المعدن ، ووجد أن هناك توزيع منتظم في الفولاذ الصلب وعلى هذا يجب التأكد من خلو المواد الخام من الرصاص في عملية إنتاج الفولاذ .

وإذا كان من الصعب إدخال عنصر مشع بتركيز شحيح إلى داخل المادة شععنا سطح المادة النقي بالنيوترونات أو بالدقائق المشحونة . وهذا سيفيد في تحديد التوزيع لعنصر ما في المادة وفي تحديد مكونات المادة باستخدام التصوير الإشعاعي الآلي وقياس طيف أشعة جاما . وهذه الطريقة مفيدة فقط في تحديد التراكيز الشحيحة في مخلوط بسيط .

ومن الطرق الحديثة المستخدمة لنفس الغرض الميكروسكوب الماسح الإلكتروني والذي يستخدم فلورسنس أشعة إكس الناتجة في التعرف على العناصر .

ومن الطرق الأخرى المستخدمة طريقة غمس سطح العينة (معدن أو خامة) المصقول في محلول يحتوي مادة مشعة ، والتي ستتفاعل بطريقة انتقائية مع أحد مكونات السطح . ويبين الشكل (3–7) التصوير الإشعاعي الآلي الناتج عن غمس خام ما في محلول إثيل أكسانثات البوتاسيوم الموسوم بالكبريت – 35 (^{35}S) وتتفاعل الأكسانثات انتقائياً مع بلند الزنك ZnS في العينة . ونظراً لقلة طاقة بيتا (β) $E_{max} = 0.2$ MeV فإن استبانة الصورة الإشعاعية الآلية أفضل . وهذا يشبه

عملية صبغ عينة ميكروسكوب لإظهار جزء معين بوضوح .



شكل 3–7 : أ) صورة ب) تصوير إشعاعي آلي لخام معالج بمحلول الأكسانثات المحتوي على ^{32}S المشع . يمتص الزنك بلند الأكسانثات ولا يمتصها البيرايت .

وازدادت أهمية التصوير الإشعاعي الآلي في البيولوجي وخاصة في دراسة انتشار وأيض المركبات المعطاة للنبات أو للحيوان .

7-4 الكيمياء غير العضوية والعضوية والحيوية

Inorganic , Organic , and Biochemistry

تلعب العناصر المشعة دوراً مميزاً في دراسة التفاعلات الكيميائية والبيولوجية. وذلك لسهولة التعرف على مكان كل ذرة من خلال تحللها الإشعاعي وتوفر حساسية كشف كافية . ومن النظائر المشعة التي يمكن تتبعها وعدم فقدها في خطوات التفاعل الكيميائي ^{14}C و ^{32}P و ^{198}Au والتي قد تكشف تفاصيل تفاعلات الأيض والعمليات الحيوية والتي لا يمكن الكشف عنها بالطرق الأخرى ، وسوف نتطرق إلى بعض النواحي التطبيقية والدراسات المبدئية .

7-4-1 تحديد مسارات التفاعل الكيميائي

Determination of Chemical Reaction Paths

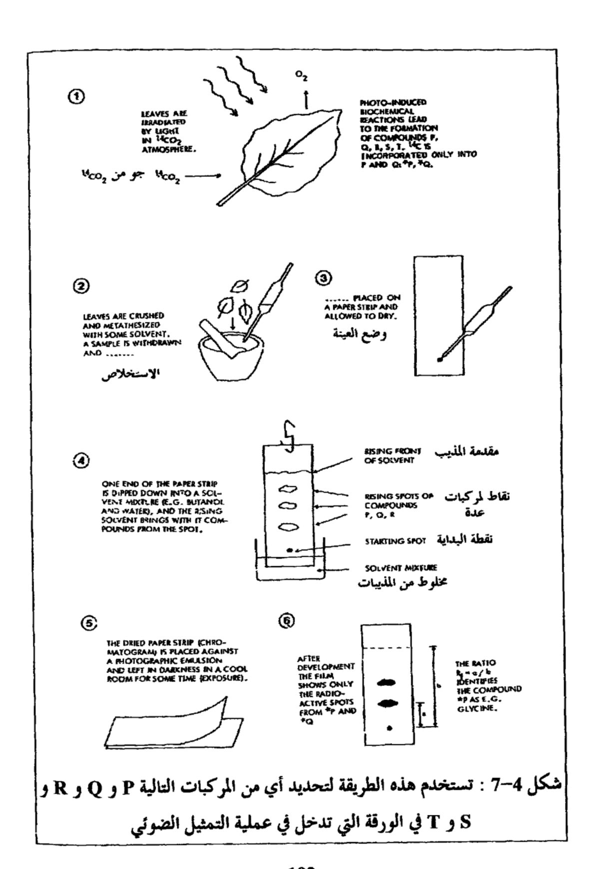
أصبح استخدام النظائر المشعة في دراسة خطوات التفاعل الكيميائي معروفاً ومشهوراً إلى حد كبير . وسوف ندرس بعض الأمثلة على هذا .

إذا تم وسم الفينول بالديوتيريوم أو التريتيوم (T) في مجموعة الهيدروكسيل ومن ثم تم تسخينه إلى درجة حرارة أقل من درجة التفكك لوحظ أن الهيدروجين الموسوم يهاجر من مجموعة الهيدروكسيل إلى أماكن الهيدروجين الأخرى على حلقة البنزين إما بواسطة إعادة الترتيب الجزيئي الداخلي أو من خلال التفاعلات بين الجزيئات . فإذا استخدمنا C_6H_5OT و C_6H_4TOH حصلنا على C_6H_4TOT ، ولا يمكن له أن يتكون إلا من خلال الاصطدامات بين الجزيئات ، مما يعني استبعاد إعادة الترتيب الجزيئي الداخلي كآلية لحدوث التفاعل .

ومن الأمثلة الرائعة على استخدام النظائر المشعة ، دراسة خطوات التفاعل في عملية التمثيل الضوئي للكربوهيدرات من غاز CO_2 في الجو . وتمثل المعادلة التالية التفاعل الكلي :

$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow[\text{كلوروفيل}]{\text{ضوء}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O \qquad (7-3)$$

ولقد تمكن العالم م. كالفن وزملائه في التعرف على الخطوات الواقعة في الوسط باستخدام ^{14}C و ^{32}P و T (الشكل 4-7) . ويتم وضع النباتات في جو يحتوي على CO_2 الموسوم بالكربون -14 ^{14}C وتسليط الضوء عليه ، بعد ذلك تزال النباتات التي تعرضت للضوء لفترات زمنية مختلفة ثم تفصل المكونات الجزيئية باستخدام أنواع الكروموتوغرافيا المختلفة . إن وجود الكربون المشع في مركب ما دليل على وجوده في عملية التمثيل الضوئي (الشكل 4-7) . وأما الفسفور والهيدروجين فيستدل على وجودهم من خلال الكشف عن النشاط الإشعاعي للفسفور والتريتيوم في المركبات .



شكل 4–7 : تستخدم هذه الطريقة لتحديد أي من المركبات التالية P و Q و R و S و T في الورقة التي تدخل في عملية التمثيل الضوئي

7-4-2 تحديد سرعة التبادل الكيميائي

Determination of Chemical Exchang Rate

إذا خلطنا مادتين كيميائيتين مختلفتين ومشتركتين في عنصر ما في المحلول ، فقد يحصل تبادل للمكون المشترك بينهما . ويمكن تمثيل ذلك بالمعادلة الكيميائية (4–7) .

$$AX + BX^* \rightarrow AX^* + BX \qquad (7-4)$$

ويبقى تركيز ونوع المواد الكيميائية كما هو دون أي تغيير ، ولا يمكن ملاحظة التبادل إلا إذا وسمنا الذرات في إحدى المتفاعلات . فيمكن تتبع التفاعل إذا استخدمنا X^* كنظير مشع لـ X . وفي حالة الاتزان يتوزع النشاط الإشعاعي بالتساوي بين المادتين الكيميائيتين ، أي أن النشاط النوعي لـ X^* في AX و BX متساوي . وفي حال كانت AX و BX إلكتروليتات قوية حدث التوزيع المتساوي فور خلطهم . وإذا كانت إحدى المواد المتفاعلة معقد غير عضوي أو جزيء عضوي كان التبادل بطيء في حال حدوثه .

وبما أن الصيغ الكيميائية لم تتغير من خلال التبادل النظيري فإنه لن يكون هناك أي تغيير في المحتوى الحراري ، وسيكون هناك زيادة في الفوضى الكلية للنظام (الأنتروبي الكلية للنظام) نتيجة للانتشار المنتظم لنظير X في جميع أنحاء النظام . وتؤدي هذه الزيادة في الأنتروبي إلى زيادة في الطاقة الحرة ، مما يجعل التبادل النظيري تفاعلاً تلقائياً . وعلى الرغم من هذه التلقائية ، فإن التبادل النظيري قد لا يحدث أو يكون بطيئاً جداً نتيجة لوجود طاقة تنشيط كبيرة وضرورية للوصول إلى الحالة الانتقالية .

وبالرجوع إلى المعادلة (4–7) فإن سرعة زيادة AX^* تساوي سرعة تكونه ناقص سرعة هدمه (تحلله) . وتساوي سرعة تكون الناتج حاصل ضرب سرعة التفاعل K_r في كسر التفاعلات التي تحدث مع BX^* النشط في كسر التفاعلات

التي تحدث مع AX غير النشط . ومن خلال استخدامنا للرموز التالية :

$$a = [AX] + [AX^*] \quad (7-5 \text{ أ})$$

$$b = [BX] + [BX^*] \quad (7-5 \text{ ب})$$

$$x = [AX^*] \quad (7-6 \text{ أ})$$

$$y = [BX^*] \quad (7-6 \text{ ب})$$

فإن سرعة التكون K_f تساوي :

$$K_r \frac{y}{b} \frac{(a-x)}{a} \quad (7-7)$$

وسرعة الهدم K_d تساوي :

$$K_r \frac{x}{a} \frac{(b-y)}{b} \quad (7-8)$$

وإن $\frac{d[AX^*]}{dt} = \frac{dx}{dt}$ وتساوي :

$$\frac{dx}{dt} = K_f - K_d = \frac{K_r}{ab}(ay - bx) \quad (7-9)$$

وحل هذه المعادلة (7-9) يساوي :

$$\ln(1-F) = -\frac{(a+b)}{ab} K_r t \quad (7-10)$$

وأما $F = \frac{X_t}{X_\infty}$ (X_∞ تساوي قيمة X_t عندما $t = \infty$ أي عند الاتزان) .

وإذا رسمنا log(1-F) ضد t حصلنا على خط مستقيم ميله يساوي سرعة التبادل K_r . ويستخدم التبادل النظيري بشكل رئيسي في دراسة حركيات التفاعلات الكيميائية ذات أنصاف الأعمار التي تزيد عن دقيقة . ومن الأمثلة على ذلك التبادل بين الكروميوم الثنائي والثلاثي في محاليل $HClO_4$. فإذا كان تركيز أيون الكرميوم الكلي 0.1 جـ (M) احتاج 14 يوماً ليصل التبادل إلى ما نسبته 50٪ عند درجة حرارة

الغرفة . وبما أن شحنة الكروميوم (II) والكروميوم (III) موجبة فإنه من غير المعقول أن يقتربوا من بعضهما البعض ليتبادلوا الإلكترون والميكانيكية المقترحة أو المتوقعة مبنية على وجود أيون سالب كجسر بين الأيونين الموجبين فيقلل من قوة التنافر بينهما .

وإذا استخدمنا $Cr(III)^*$ النشط حصلنا على الميكانيكية التالية لتفاعل الاستبدالي النظيري :

$$Cr(III)^* + X^- + Cr(II) \rightarrow [Cr^*\text{-}X\text{-}Cr]^{4+} \qquad (7-11)$$

$$[Cr^* - X - Cr]^{4+} \rightarrow Cr(II)^* + X^- + Cr(III) \qquad (7-12)$$

وتدعم هذه الميكانيكية بوجود أيونات سالبة لديها القدرة على تكوين معقدات بسهولة أكثر من أيون البيركلورات . فإذا استخدمنا محلول HCl بدل $HClO_4$ ازدادت سرعة التبادل فوصل نصف زمن التبادل إلى دقيقتين ، وهذا يؤيد الميكانيكية المقترحة لأن لأيونات الكلوريد قدرة أعلى على تكوين المعقدات من أيونات البيركلورات . ويستفاد من الكروميوم المشع في الدلالة على التبادل .

7-4-3 تحديد ثوابت الاتزان

Determination of Equilibrium Constants

ونظراً لحساسية الكشف عن النظائر المشعة ، فلقد استخدمها العلماء في قياس الذائبية للمواد القليلة الذوبان . ولقد أجرى العالمان دي . هافزي وبانيث (عام 1913) أول هذه التجارب لدراسة ذائبية كرومات الرصاص . فأضيفت أيونات الكرومات إلى محلول $PbCl_2$ المحتوي على كمية معروفة من ^{210}Pb فترسب كل الرصاص على هيئة $PbCrO_4$. احتوى الراسب على 2030 وحدة نشاط إشعاعي وكانت كتلته 11.35 ملغم . أي أن النشاط النوعي للراسب $= \frac{2030}{11.35}$

179 وحدة نشاط/ملغم . بعد ذلـك أخـذ الراسـب ووضـع في الماء ورج ، فـذاب جزء مـن الراسـب فـاحتوى اللـتر مـن المحلـول علـى 2.14 وحـدة إشـعاع . أي أن الذائبية لكرومات الرصاص تساوي $\frac{2.14}{179} = 0.012$ ملغـم/لـتر أو 3.7×10^{-8} جـ Pb^{2+} ، وإذا كـان تركيـز $[Pb^{2+}] = [CrO_4^{2-}]$ ، فـإن حـاصل الذائبيـة $K_{sp} = (3.7\times10^{-8})^2 \approx 1\times10^{-15}$ والقيمة المقاسة حديثاً بدقة أكثر 2×10^{-14} .

بعـد ذلـك ازداد اسـتخدام النظـائر المشعة ، فاسـتخدمت في قيـاس ثوابـت الاستقرار للمعادن β_n والتي تُعرف كالآتي :

$$\beta_n = \frac{[ML_n]}{[M][L]^n} \qquad (7-13)$$

حيـث حذفـت الشـحنات للتسـهيل (فعلـى سـبيل المثـال $M = Pu^{4+}$ و $L = Cl^-$) . ومِ الطرق المستخدمة في قياس β_n : النظائر المشعة بتركيز شحيح مع الاستخلاص بالمذيب والتبادل الأيوني . وسوف ندرس أولاً الاستخلاص بالمذيب .

إذا كونت المعادن معقدات متعادلة مع المتصلات العضوية فإن هذه المعقـدات تذوب في المذيبات العضوية (كالكيروسين والبنزين والتلوين والكلوروفـورم ورابع كلوريد الكربون) حسب المعادلة التالية :

$$M^{2+}_{(aq)} + 2HA_{(org)} \Leftrightarrow MA_{Z_{(org)}} + zH^+_{(ag)} \qquad (7-14)$$

حيـث أن HA حـامض عضـوي ضعيـف مثـل أسـتيل أسـيتون وأوكسـين ودايثيازون وحامض داي إيثل هكسيل الفوسفوريك وغيرها . ويتم التحكم بتوزيع المعدن D بين المذيب العضوي والماء من خلال العلاقة التالية :

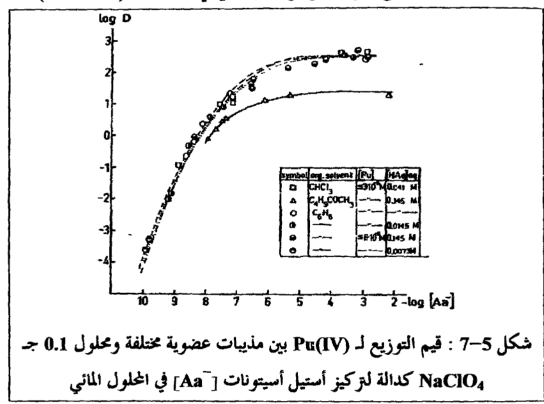
$$\frac{1}{D} = \frac{[\text{المعدن}]_{aq}}{[\text{المعدن}]_{org}} = \left(\lambda_Z \beta_Z [A]^Z\right)^{-1} \sum_{n=0}^{N} \beta_n [A]^n \qquad (7-15)$$

وتقاس قيمة D بسهولة باستخدام نظائر المعادن بتركيز شحيح ، وZ الشحنة

(وتساوي 2 لـ Sr^{2+} و 3 لـ La^{3+} و 2 لـ UO_2^{2+} و 4 لـ Th^{4+} وهكذا) ، وβ_n ثابت الاستقرار للمعدن وتعرف λ_Z في حال n=z كالآتي :

$$\lambda_n = \left[MA_n^{z-n}\right]_{org} / \left[MA_n^{z-n}\right]_{(aq)} \qquad (7-16)$$

وتعتمد D فقط على [A] وهو تركيز المتصلة الحرة في الطبقة المائية (معادلة 15-7) .



شكل 5-7 : قيم التوزيع لـ Pu(IV) بين مذيبات عضوية مختلفة ومحلول 0.1 جـ $NaClO_4$ كدالة لتركيز أستيل أسيتونات $[Aa^-]$ في المحلول المائي

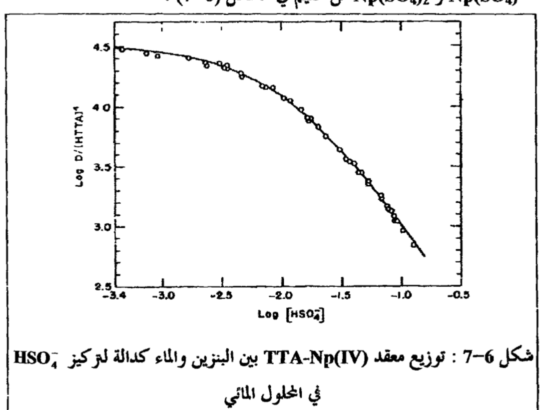
ويبين الشكل (5-7) قيم التوزيع المقاسة لـ Pu(IV) بين الماء وثلاث مذيبات عضوية مختلفة كدالة لتركيز أيون أستيل أسيتونات $[Aa^-]$ في الوسط المائي. وتحسب قيم ثوابت التكوين لـ $PuAa^{3+}$ و $PuAa_2^{2+}$ و $PuAa_3^{+}$ و $PuAa_4$ وقيم λ_Z (مثل ثابت التوزيع لـ $PuAa_4$) من المنحنيات الموضحة في الشكل (5-7) .

وإذا احتوى النظام على معقدات MB_p والتي لا تذوب في المذيب العضوي

فإنه بالإمكان استخدام النظام السابق (MA_n) مع المتصلة B^- . فعلى سبيل المثال تم دراسة ارتباط Np^{4+} مع HSO_4^- في نظام المذيبين (الوسطين) ، محلول 0.1 جـ $NaClO_4$ في الماء ومحلول المادة العضوية ثينول ثلاثي فلورو الأسيتون (HTTA) "مادة الاستخلاص" في $CHCl_3$ الكلوروفورم . وفي هذه الدراسة تستخدم العلاقة التالية :

$$\frac{1}{D} = a + b\sum_{P=0}^{N} \beta_P [B]^P \qquad (7-17)$$

حيث أن a و b ثابتين للنظام Np-HTTA (يجب أن لا يتغير تركيز HTTA ولا درجة الحموضة pH) . وتم حساب قيم ثوابت التكوين لـ $Np(SO_4)^{2+}$ و $Np(SO_4)_2$ من القيم في الشكل (6–7) .



شكل 6–7 : توزيع معقد TTA-Np(IV) بين البنزين والماء كدالة لتركيز HSO_4^- في المحلول المائي

وتستخدم هذه العلاقات في الحالات التي قد يصل فيها تركيز المعدن إلى أقل

من 10^{-12} جـ . بعد ذلك استخدمت هذه الطريقة في دراسة معقدات العناصر التي تأتي بعد اليورانيوم ، وذلك لعدم الرغبة (تجنباً للإشعاعات) واستحالة استخدام كميات كبيرة من هذه العناصر .

يعتمد التبادل الأيوني على توزيع أيونات المعادن الموجبة بين الماء وراتنج عضوي ذو خاصية تبادل أيوني موجب حسب العلاقة التالية :

$$\lambda_P = \left[MB_P^{Z-P}\right]_{راتنج} / \left[MB_P^{Z-P}\right]_{aq} \qquad (7-18)$$

حيث أن P<Z وتقاس λ_P بدلالة كمية المعدن لكل غرام راتنج جاف مقسومة على كمية نفس المعدن لكل مليليتر محلول . وفي حال تكون عدة معقدات (MB^{Z-1}, MB_2^{Z-2} ... إلخ) فإن التوزيع Q للمعدن المشع بين الراتنج والوسط المائي يتبع العلاقة التالية :

$$O = \sum_0^N (Q - \lambda_P)\beta_P[B]^P \qquad (7-19)$$

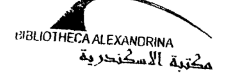
وإذا تم قياس Q كدالة لتركيز [B] ، استطعنا حساب λ_P و β_P . وفي حال كانت P>2 أصبحت هذه الطريقة أكثر تعقيداً من الاستخلاص بالمذيب .

7-4-4 دراسة السطوح والتفاعلات في المواد الصلبة

Studies of Surfaces and Reactions in Solids

أثبتت الدراسات باستخدام النظائر المشعة بتركيز شحيح وجود تبادل سريع جداً بين ذرات المعدن الموجودة على سطحه وأيونات ذلك المعدن في المحلول .

وعلى الرغم من ارتباط التبادل مع سطح المادة الصلبة ، فلقد حدث في خلال دقائق تبادل مع ذرات عمقها مئات الطبقات في سطح المعدن ، ونحصل على عمق اختراق (توغل) النظائر المشعة الممتزة من المحلول من قياس الامتصاص



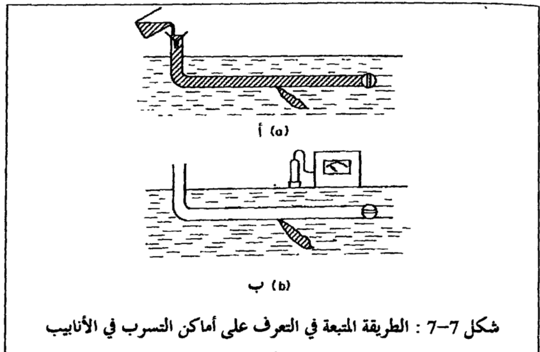
للإشعاع . وبنفس الطريقة يدرس انتشار ذرات ما في القطع الصلبة المكونة من تلك الذرات . فإذا استخدمت بلورات وحيدة من الفضة وعلقت في محلول من نترات الفضة الموسومة بـ ^{110m}Ag ظهرت بوضوح سرعات الانتشار المختلفة في وجوه البلورة المختلفة . وتقاس مساحة سطح المواد الصلبة من خلال امتصاص (امتزاز) النظائر الشحيحة التركيز على السطح .

ولدراسة الامتصاص والانتشار درو مهم في فهم آلية حدوثهما وفي فهم آلية تبلور أو تكون المواد الصلبة الجديدة . وتظهر أهمية ذلك في صناعة الإسمنت والزجاج وفي إنتاج شبه الموصلات وفي صناعة الدهان . ولدراسة التفاعلات التي تجرى على السطح أهمية عملية في التآكل كالصدأ وفي طلي المعادن وتلميعها وفي كيفية عمل المنظفات .

7-5 جريان السوائل Flow of Liquids

تلعب النظائر الشحيحة التركيز دور مهم في علم المياه Hydrology . وباستخدام المواد والنظائر المشعة التالية T_2O و $^{24}Na^+$ و $^{82}Br^-$ و ^{51}Cr-EDTA وغير ذلك من العناصر والمركبات المشعة يمكن قياس حجم المخزون الاحتياطي للمياه الجوفية وحركة المياه السطحية والجوفية . كما تستخدم النظائر المشعة في تحديد استهلاك المياه وجريانها في الصناعات وفي فحص تسرب المياه من السدود والأنابيب .

يبين الشكل (7–7) الطريقة المتبعة في التعرف على أماكن التسرب في الأنابيب وفي دراسة توصيلات الكوابل الكهربائية تحت الأرض باستخدام الغازات المشعة مثل ^{85}Kr , ^{133}Xe .



شكل 7–7 : الطريقة المتبعة في التعرف على أماكن التسرب في الأنابيب

أ) يضاف النظير المشع إلى السائل في الأنبوب .

ب) يتم التعرف على النشاط الإشعاعي من التسرب بعد إزالة المحلول المشع من داخل الأنبوب .

إنه لمن الصعب قياس حجم السائل في الأنظمة المغلقة من خلال معرفة أبعاد الخزان الخارجية وخاصة إذا كان هناك عملية خلط تجري بطريقة الدوران الخارجي أو التحريك الداخلي ، ومن الأمثلة على ذلك قياس حجم حامض الكبريتيك في مصنع التقعد حيث يكون هناك عملية خلط داخلية كبيرة بين الحامض والهيدروكربون تمنع تحديد المستوى بسهولة ، ولهذا يضاف ^{134}Cs معروف الكمية إلى H_2SO_4 ، ومن خلال التخفيف للنظير المشع نحسب حجم H_2SO_4 الكلي .

وفي حال كان هناك جريان مستمر من وإلى الخزانات ولكمية ثابتة ، استخدمت الطريقة التالية : تضاف كمية معروفة من النظير المشع إلى الخط القادم إلى الخزان ونفترض رياضياً أن هناك عملية خلط كاملة وفي الحال بين المجرى القادم

ومحتويات الخزان ، أي أن هناك نقصان أسي لتركيز النظير المشع ، وتحدد سرعته من الكمية المضافة والحجم حسب المعادلة التالية :

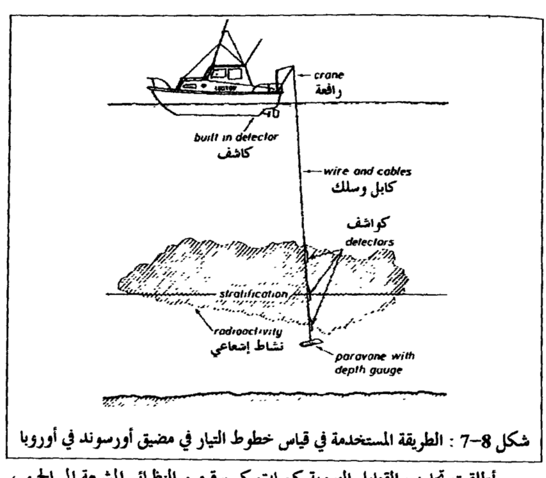
$$R=R_0e^{-Ft/V} \quad (7-20)$$

حيث أن R_0 سرعة العد عند الزمن صفر و t زمن قياس R سرعة العد عند نفس النقطة .

وتقاس سرعة جريان F الأنهار والجداول بواسطة إضافة أو حقن مادة مشعة إلى المياه الجارية ومن ثم يقاس الزمن الذي تحتاجه للوصول إلى كاشف موضوع في أسفل المجرى . فإذا أضيفت الكمية المعروفة (A_0) من المادة المشعة إلى النهر ومن ثم سجل العد الكلي (R_{tot} الكلي) في أسفل المجرى ، فإن سرعة الجريان (F) تساوي :

$$F = \psi \frac{A_0}{R_{\text{الكلي}}} \quad (7-21)$$

حيث أن ψ معامل المعايرة والذي يحدد تحت ظروف معروفة ، وتأخذ هذه الطريقة بالحسبان عمليات الخلط الطولية والعرضية . ولتجنب عمليات التلوث الخطرة يجب علينا التأكد من أن الفضلات المنزلية والصناعية (غازات وسوائل ومواد صلبة) موزعة توزيعاً منتظماً ، ولمعرفة مواقع التوزيع المختلفة تضاف كمية من نظير مشع إلى موقع الفحص ، ومن ثم تتم عملية التتبع على أعماق وارتفاعات واتجاهات مختلفة (الشكل 8-7) . وقد بينت إحدى الدراسات على المخلفات الصلبة المفرغة في نهر التايمز عند نقطة معينة تحرك هذه المخلفات إلى أعلى المجرى وقد أدى ذلك إلى تغيير في موقع أنبوب التفريغ .



شكل 8-7 : الطريقة المستخدمة في قياس خطوط التيار في مضيق أورسوند في أوروبا

أطلقت تجارب القنابل النووية كميات كبيرة من النظائر المشعة إلى الجو ، وقد نزلت هذه النظائر إلى سطح الأرض بفعل ثقلها أو بفعل الأمطار. واستفاد علماء الجيوفيزياء من هذا التساقط فقاموا بقياس T (HTO ماء) و ^{90}Sr و ^{137}Cs وبعض نواتج الانشطار الأخرى في المياه لمعرفة مسارها وحركتها من اليابسة عبر البحيرات والأنهار إلى البحار وفي دراسة التيارات المائية في المحيطات وعملية التبادل بين المياه السطحية والجوفية . ونتيجة لهذه الدراسات تم رسم خارطة دوران المياه في الكرة الأرضية وبالتفصيل . كما تمت دراسة الأعاصير الموسمية وتكونها من خلال قياس كمية الماء الموجودة في عين الإعصار والمأخوذة من المحيط وذلك لأن تركيز HTO في الجو العادي مختلف عن ذلك في مياه المحيط السطحية.

7-6 بعض استخدامات النظائر المشعة في الصناعة

Some Industrial Uses of Radiotracers

استخدمت الصناعة النظائر المشعة في مجالات متعددة وكثيرة ، ويقدر عدد المصانع المستخدمة بأكثر من 250 مصنعاً في الولايات المتحدة ، منها إنتاج المعادن والكيماويات والبلاستيك والأدوية والورق والمطاط والفخار والأدوات الزجاجية والطعام والتبغ وغيرها .

كما استخدمت النظائر المشعة في دراسة فعالية الخلط وتأثير الشكل الهندسي للمفاعلات وزمن الإقامة في المفاعلات وسرعة الجريان ونوعية أعمدة وأبراج التقطير والامتصاص وغيرها .

يعتبر الخلط من العمليات الميكانيكية المهمة في الصناعات ، فالخلط الرديء يؤدي إلى منتجات غير مرضي عنها وإلى مردود قليل ، أما الخلط الزائد عن الحاجة فيؤدي إلى ضياع الوقت والطاقة . ويمكن أن نتابع الاقتراب من الاتزان الخلطي بإضافة نواة مشعة إلى وعاء الخلط أو وسم إحدى المكونات ، وتتم المتابعة من خلال القياسات الخارجية أو من خلال أخذ عينات على فترات زمنية مختلفة . ومن الأمثلة على ذلك عملية خلط الإسمنت مع الرمل والحصى والماء لتعطي الخرسانة والتي تمت من خلال استخدام الحصى المشععة ، وإذا أضيف $^{24}NaHCO_3$ إلى مصهور الزجاج تبين للدارس مقدار التجانس في المصهور ، واستخدمت مركبات ^{95}Zr العضوية في متابعة التجانس في المنتجات البترولية ، ومن الاستخدامات الأخرى إضافة الفيتامينات إلى الطحين ومسحوق الفحم إلى المطاط . ويقاس نفاذ وانتقال المواد من خلال جعل المادة التي تنفذ مشعة ، ولقد استخدمت هذه الطريقة في تتبع نفاذ واستهلاك القطع الموجودة في محركات السيارات وفي أدوات القطع

وفي مُحْمِل الكُرَيّات وفي بطانة الأفران وفي كشط الدهان وغيرها ، على أن يكـون للسطح الذي ينفذ نشاط نوعي عالٍ . وإذا كان مـن الصعب تعليـم المادة بإضافة ذرات مشعة لها (كـالطلي عليهـا) ، فإنـه لا بُـد مـن تشـعيعها بواسـطة مسـارعات الدقائق أو المفاعلات .

7-8 تصرف النظائر شحيحة التركيز

Behavior of Trace Concentrations

تشترك ذرات النظير المشع شحيح التركيز في الكثير من التطبيقات مع كميـة كبيرة من ذرات نظير غير مشع لنفس العنصر . ويسمى الشـريك المسـتقر بالحـامل "Carrier" وذلـك لأنـه يحمـل النشـاط الإشـعاعي ويؤكـد التصـرف الكيميـائي العادي. فإذا أخذت عينة تتحلل 10^7 تحلل/الدقيقة ونصف عمرها ساعة واحدة فإن عدد ذراتها 1.7×10^9 ذرة ، وإذا كان نصف عمرها سنة واحدة فإن عـدد ذراتهـا 1.5×10^{13} ذرة . فإذا أذيبـت هـذه العينـة في لـتر مـن المحلول أعطـت الـتركيزين التـاليين 2.8×10^{-15} جـ و 2.5×10^{-11} جـ علـى التـوالي . وقـد يختلـف التصـرف الكيميائي اختلافاً تاماً عنـد هذيـن الـتركيزين بالمقارنـة مـع الـتراكيز العاليـة ، فإذا أضيفت بضع غرامات من نظير غير مشع لنفس العنصر كحـامل ارتفعـت الـتراكيز إلى 10^{-3} جـ و 10^{-1} جـ وأصبح التصرف عادي .

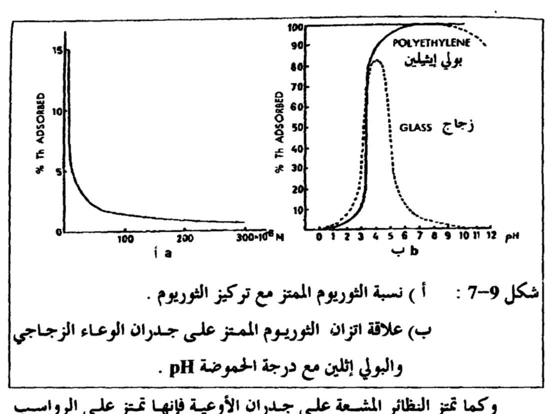
وإذا كان لابُد من أن يتبع النظير المشع الخواص الكيميائية للنظير الحامل فإنه من الضروري أن يحـدث تبـادل نظـيري بينهمـا ، وإذا كـان التبـادل النظـيري غـير معروف من قبل فلا بـد مـن إثباتـه بالتجربـة قبـل أن نفـترض تصرفهمـا الكيميـائي المشـابه ، وخاصـة إذا كـان للنظـير المشـع رقـم تأكسـد يختلـف عـن الحـامل عنـد

خلطهما. وسوف ندرس التصرف الكيميائي للنظير المشع شحيح التركيز وذلك لوجود بعض التطبيقات التي يستخدم فيها النظير المشع شحيح التركيز فقط .

7-8-1 الامتزاز Adsorption

للمواد المذابة خاصية الامتزاز على السطح ، فإذا أردنا تغطية السطح الزجاجي الداخلي لوعاء حجمه واحد ليتر بطبقة سمكها جزيء واحد من أيون موجب مميه احتجنا إلى $10^{-7} - 10^{-8}$ مول منه . وبما أن تركيز النظير المشع الشحيح أقل من ذلك فإن جميع الذرات المشعة سوف تمتز على جدران الوعاء وتعتمد كمية النظير المشع الممتز على جدران الوعاء على تركيزه وصيغته الكيميائية وعلى طبيعة المادة المكونة للوعاء . ويبين الشكل (9–7) اختلاف امتزاز الثوريوم على جدران من زجاج ومن بولي إثيلين مع التركيز ودرجة الحموضة .

ويعكس التغير في الامتزاز مع درجة الحموضة امتزاز الأنواع المميهة المختلفة التي كونها الثوريوم كلما ازدادت درجة الحموضة . ويزداد الامتزاز بوجه عام مع شحنة الأيون حسب الترتيب التالي $M^{4+} > M^{3+} > M^{2+} > M^{1+}$. ويبين الشكل (7–9 b) أهمية طبيعة السطح بين البولي إثيلين والزجاج . وفي حالة Pm(III) فإن ترتيب الامتزاز كالآتي : بولي فينيل الكلوريد > الفولاذ > الفضة > البلاتين . ويؤدي إضافة النظير الحامل إلى تخفيف النظير الشحيح ، أي أن جزء قليل منه سوف يمتز (الشكل 7–9 a) ، ويؤدي التخفيف إلى انخفاض في النشاط النوعي للعنصر المشع وإلى تأثير سلبي في بعض الأنواع من التجارب . ولتجنب النقص في النشاط النوعي تضاف كميات كبيرة من نظير لعنصر آخر يمتز بسهولة وقد يسد السطوح المتوفرة لامتزاز النظير الشحيح .



شكل 9–7 : أ) نسبة الثوريوم الممتز مع تركيز الثوريوم .

ب) علاقة اتزان الثوريوم الممتز على جدران الوعاء الزجاجي والبولي إثلين مع درجة الحموضة pH .

وكما تمتز النظائر المشعة على جدران الأوعية فإنها تمتز على الرواسب الموجودة في النظام . وتعتمد الكمية الممتزة على طبيعة الراسب وصيغته وشكله وطريقة ترسيبه . فإذا تم ترسيب يوديد الفضة من محلول فيه زيادة في أيونات الفضة كان للراسب سطح موجب لوجود أيونات فضة زائدة على السطح . ويحدث العكس إذا تم الترسيب من محلول يحتوي على أيونات اليوديد السالبة الزائدة . وعند إضافة تركيز شحيح من الرصاص المشع إلى كل منهما في الماء ، تبين أن الراسب الحامل للشحنة السالبة على سطحه يمتز أكثر من 70٪ من أيونات الرصاص الشحيحة بالمقارنة مع الراسب الحامل للشحنة الموجبة على سطحه والذي يمتز أقل من 5٪ . وتزداد كمية الامتزاز مع الشحنة الأيونية للنظير المشع الشحيح، فعلى سبيل المثال يمتز حوالي 7٪ من Ra^{2+} و 75٪ من Ac^{3+} و 100٪ من Th^{4+} على راسب Ag_2S (كبريتيد الفضة) .

وتنص قاعدة بانيث وفاجان The Paneth and Fajans rule لامتزاز النظائر شحيحة التركيز على "تمتز المكونات الصغيرة (القليلة) على المكونات الكبيرة (الكثيرة) الصلبة أو تترسب معها إذا كونت مع أحد أيونات المكونات الكبيرة مركب غير ذائب" .

واستخدم العلماء خواص الامتزاز للعناصر الشحيحة في عزلها وفي فصلها عن بعضها البعض بناءً على خواص امتزازها .

7-8-2 الغرويات المشعة Radiocolloids

بالإضافة لامتزاز العناصر المشعة شحيحة التركيز على سطوح الأوعية الصلبة والرواسب فإنها تمتز على أي نوع من المواد الصلبة المعلقة أو الملامسة للمحلول . ومن الأمثلة على ذلك الغبار وألياف السليلوز وقطع الزجاج والمواد العضوية وغيرها . وإذا احتوى المحلول على جزيئات كبيرة مثل نواتج تميه الفلزات المبلمرة فإنها ستمتز العناصر الشحيحة . ويؤدي وجود هذه المواد إلى ظاهرة تكون الغرويات المشعة Radiocolloid formation حيث تتجمع الأنوية المشعة مع بعضها البعض مكونة تجمعات شبه غروية في المحلول . ولقد درست هذه الظاهرة بالتفصيل بطريقة سرعة الانتشار وطريقة التصوير الإشعاعي الآلي . ولتجنب تكون الغرويات المشعة ، تحفظ المحاليل عند درجة حموضة pH منخفضة ونقية من الدقائق الكبيرة الغريبة .

7-8-3 تفاعلات الاتزان Equilibrium Reactions

يؤدي التركيز المنخفض للعناصر المشعة الشحيحة إلى تكون كميات مختلفة من المواد المذابة من تلك المعروفة عند اتزان المواد ذات التركيز العالي . فعلى سبيل

المثال تتميه أيونات اليورانيل حسب الاتزان التالي :

$$mUO_2^{2+} + pH_2O \Leftrightarrow (UO_2)_m(OH)_p^{2m-p} + pH^+ \quad (7-22)$$

فإذا كان تركيز اليورانيوم عالٍ انزاح الاتزان إلى اليمين مكوناً بوليمرات ذات خواص مختلفة عن أيون اليورانيل UO_2^{2+} . وعند تركيز اليورانيوم 0.001 جـ و pH = 6 يتبلمر اليورانيوم بنسبة تزيد عن 50٪ ، بينما ينعدم التبلمر تقريباً عندما يصل تركيز اليورانيوم إلى أقل من 10^{-6} جـ . ويختلف موضع الاتزان بين الكميات الكبيرة للمواد والكميات الشحيحة للمواد وتستخدم هذه الحقيقة في دراسة خواص أيون معدن ما عند درجات الحموضة العالية وبعيداً عن تفاعلات البلمرة .

وقد تظهر تعقيدات إضافية في المحلول نتيجة لتفاعل المواد المشعة شحيحة التركيز ، فعلى سبيل المثال ، عندما درست خواص البروتاكتينيوم الخماسي Pa(V) وجد أنه يستخلص إلى الأكسيلين النقي من محلول 1 جـ $HClO_4$ وذلك لوجود شوائب عضوية في الأكسيلين وبتراكيز أقل من التي يمكن الكشف عنها . ولإثبات هذا أضيف الثوريوم بتركيز 10^{-4} جـ إلى المحلول لأنه يكون معقدات مع هذه الشوائب وفعلاً لم يستخلص البروتاكتينيوم إلى الأكسيلين .

7-8-4 الترسيب والتبلور

Precipitation and Crystallization

نظراً لانخفاض تركيز المواد المشعة شحيحة التركيز في المحلول فإنه من النادر أن نتعدى حاصل الذائبية لملح ما نتيجة لإضافة تراكيز عالية من أيون ما مضاد . فعلى سبيل المثال إذا كان لدينا 5 كوري/ليتر من ^{212}Pb والذي يساوي 1.7×10^{-4} جـ وأضيف إليه أيون الكبريتات بتركيز 10 جـ فلن يتعدى ذائبية

كبريتات الرصاص . وفي حال تعدى حاصل الذائبية فلن يلاحظ الترسيب ، ومن الأمثلة على ذلك كبريتيد الرصاص PbS والذي له حاصل ذائبية $K_{sp} = 3.4\times10^{-28}$ ، فإذا كان تركيز $[^{212}Pb^{2+}] = 1.7\times10^{-14}$ جـ وتركيز $[S^{2-}] = 1$ جـ فمن المتوقع أن يترسب PbS ولكنه لا يلاحظ لوجوده على الشكل الغروي لانخفاض التراكيز وإذا استخدمت طريقة الطرد المركزي فإن كمية الراسب قليلة جداً لا يمكن وزنها بالطرق المعروفة .

ومن الممكن فصل الأيونات الموجودة بتركيز شحيح من المحاليل بالترسيب مستخدمين الامتزاز أو الترسيب المشترك . ويحدث الترسيب المشترك إذا كان المركب الشحيح وأيون الراسب ذو الشحنة المعاكسة تركيب بلوري مشابه للراسب . فقد يدخل الأيون النشط الشبكة البلورية للراسب عند نقطة شبكية ما وخاصة إذا كان حجم الأيون الشحيح قريب جداً من حجم الأيون الذي يحل مكانه . ومع ذلك فلقد وجد في حال كانت التراكيز شحيحة استثناء لمطلب التشابه في الحجم والتركيب البلوري . وإذا كان توزيع الشحيح متجانس في جميع أنحاء الراسب وصف بقانون التوزيع المتجانس التالي :

$$\frac{X}{Y} = D'\left(\frac{a-x}{b-y}\right) \qquad (7\text{–}23)$$

حيث تمثل X و Y كمية كل من A^+ و B^+ في الراسب وتمثل a و b التركيز الأولي لهذين الأيونين ، وأما D' فهو معامل التوزيع ، ويساوي ثابت التوزيع الحقيقي D = تركيز الشحيح في الصلب / تركيز الشحيح في المحلول ، ويرتبط مع معامل التوزيع D' من خلال معامل التحويل C .

$$D' = DC \qquad (7\text{–}24)$$

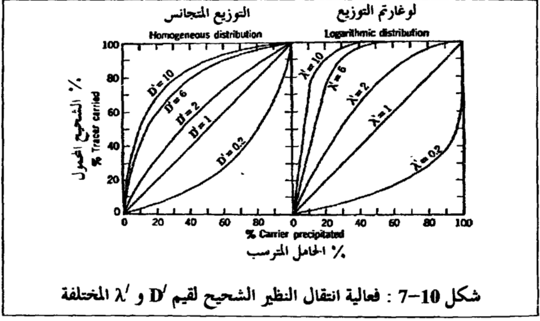
ويساوي معامل التحويل = غم مذاب لكل مل من محلول الحامل المشبع / كثافة الصلب

أي أن هناك اتزان بين كل من الراسب والمحلول .

وإذا كان هناك اتزان بين السطح المكون حديثاً للبلورة النامية والمحلـول فلـن يلاحـظ التوزيـع المتجـانس . ويوصـف النظـام في هـذه الحـالات بقــانون التوزيــع اللوغارتمي التالي :

$$\ln\left(\frac{a}{a-x}\right) = \lambda' \ln\left(\frac{b}{b-y}\right) \qquad (7-25)$$

حيث أن λ' معامل التوزيع اللوغارتمي وقيمته ثابتة لكل نظام (الشكل 10–7) .



شكل 10–7 : فعالية انتقال النظير الشحيح لقيم D' و λ' المختلفة

وتظهر أهمية التشابه البلوري في الترسيب المشترك (الإسهامي) لأيـون Ra^{2+} الشحيح مع Sr^{2+} في نترات السترنشيوم عند 34°م ، وذلك بسبب التشابه البلوري بين $Sr(NO_3)_2$ و $Ra(NO_3)_2$ وفي حال أجريت التجربة عنـد 4°م فسيترسـب السترنشيوم على هيئة $Sr(NO_3)_2.\,4H_2O$ المختلف بلوريـاً عـن $Ra(NO_3)_2$. مما يعني عدم حدوث الترسيب المشترك للراديوم عند 4°م .

5-8-7 الخواص الكهر كيميائية

Electrochemical Properties

تختزل المادة الكيميائية M_{OX}^{Z+} إلى المـادة الكيميائيـة الأخـرى M_{red}^{Z-n} حسـب معادلة الاتزان التالية :

$$M_{OX}^{Z+} + n\bar{e} \Leftrightarrow M_{red}^{Z-n} \quad (7-26)$$

وإذا طبقنا معادلة نيرنست على المعادلة (7-26) حصلنا على ما يلي :

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[M_{OX}^{Z+}]}{[M_{red}^{Z-n}]} \quad (7-27)$$

ويرمز القوس المربع إلى النشاط الكيميائي لكل مـن M_{OX}^{Z+} و M_{red}^{Z-n} ، وأن E^0 جهد الخلية المعياري . ولا يعتمـد جهـد التأكسـد والاختـزال E علـى الـتراكيز الكليـة للمواد ويعتمد فقط على النسبة بين المواد المتأكسدة والمختزلة . ولقد ثبـت هـذا عملياً من خلال التجارب التي أجريت على تراكيز شحيحة للأيونـات وعلـى تراكـيز كبـيرة وأظهـرت أن لهمـا نفـس التصـرف . فمـن الممكـن إجـراء تجـارب تفـاعلات التأكسـد والاختزال في المحاليل باستخدام التراكيز الشحيحة من المواد المشعة .

ويستخدم التحليل الكهربائي في الترسيب الكهربائي لمعدن شحيح على قطب ما . وفي هـذه الحالـة نفتقر إلى الانتقائيـة في الترسـيب الكهربـائي عنـد جهـد مضبـوط والموجودة عند التعامل مع التراكيز العالية من الأيونات . وتعتـبر قيمـة النشـاط للمـواد الموجودة بكميات شحيحة من القيم المجهولة حتـى لـو كـان الـتركيز معـروف ، وذلـك لاعتماد معامل النشاط على تصرف نظام الإلكترولايت المختلط ذو النظريـة الكيميائيـة الفقيرة لحد الآن . إضافة إلى ذلك فإنه مـن الصعـب تحديـد تركـيز المـواد الشـحيحة في المحلول نتيجة لاحتمالية الامتزاز وتكون معقدات مع الشوائب والتي تؤدي إلى نقص في

التركيز . وعلى الرغم من كل هذا تستخدم معادلة نرنست بحذر في حساب الظروف الضرورية لترسيب المعادن الشحيحة كهربائياً على الأقطاب .

كما يمكنا ترسيب مواد غير ذائبة على الأقطاب ، فعلى سبيل المثال ينتج عن التحليل الكهربائي لمحلول فلوروسليكات تركيز عال من أيون الفلوريد على القطب مما يؤدي إلى ترسيب طبقة متجانسة ورقيقة من UF_4 .

7-9 طرق فصل المواد الشحيحة التركيز

Tracer Separation Methods

تستخدم كل طرق التحليل المستخدمة في الكيمياء التقليدية في فصل وعزل العناصر والمركبات المشعة . وفي العادة نحتاج إلى إضافة كمية كبيرة من نظير حامل، إلا أن هناك بعض طرق التحليل الخاصة في فصل وعزل العناصر شحيحة التركيز الخالية من الحامل . ومن هذه الطرق الاستخلاص بالمذيب وأنواع مختلفة من كروماتوغرافيا التجزئة نظراً لانتقائيتها وسهولتها وسرعتها .

7-9-1 الاستخلاص بالسائل-السائل

Liquid-Liquid Extraction

يعرف الاستخلاص بالسائل–السائل (أو بالمذيب) على أنها طريقة للنقل الانتقائي لمواد من مخلوط في محلول مائي إلى طبقة عضوية من خلال التوصل إلى اتزان بين الطبقة المائية ومذيب عضوي ذو تكوين مناسب . ويحتوي الطور العضوي في العادة على مادة المستخلص A والتي تكون المركب المتعادل MA_N مع المادة M، والتي ستنتقل من الطور أو الطبقة المائية . ولقد درسنا في (3–4–7) بعض الشروط اللازمة لاستخلاص المعادن . وكثيراً ما يصاحب المركب المتعادل الماء أو مادة متعادلة أخرى .

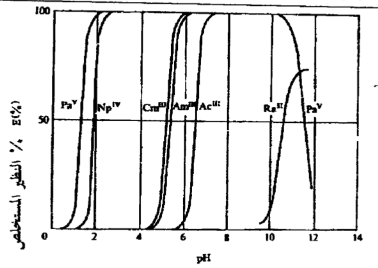
وفي حال كانت المادة غير الماء كتبت الصيغة كما يلي MA_NS_S وترمز S إلى المادة المضافة . وتلعب المذيبة وناتج الإضافة دور مهم في استخلاص مركبات المعادن .

تستخدم المحاليل العضوية للأمينات الثالثية في استخلاص الأيونات السالبة والمحاليل العضوية لفوسفات الألكيل والفوسفنات وثنائي الكيتونات في استخلاص الأيونات الموجبة .

ويرمز للجزء (للكسر) المستخلص عند تساوي حجم الطورين بـ E والتي تساوي :

$$E = D(D+1)^{-1} \qquad (7\text{–}28)$$

ولقد عرفنا D فيما سبق (معادلة 15–7) ، وتتغير قيمة D مع تركيز المواد ومكونات المذيبات ودرجة الحموضة والقوة الأيونية للطور المائي ودرجة حرارة النظام ... إلخ . ويبين الشكل (11–7) الاستخلاص لعدد من المعادن إلى الكلوروفورم بواسطة 8–هيدروكسي كوينولين . وتستخدم هذه المنحنيات في تحديد أفضل ظروف الفصل .



شكل 11–7 : علاقة نسبة النظير المستخلص من محاليل النترات المائية التي لها درجات حموضة مختلفة بواسطة 0.1 جـ 8–هيدروكسي كوينولين (أوكزين) في الكلوروفورم . $pH_{1/2}$ لـ V(IV) وFe(III) هي 0.5 ولـ U(VI) 2.6 ولـ Th(IV) 3.1 . ($pH_{1/2}$ هي درجة الحموضة التي يستخلص عندها 50٪)

2-9-7 كروماتوغرافيا التبادل الأيوني

Ion Exchange Chromatography

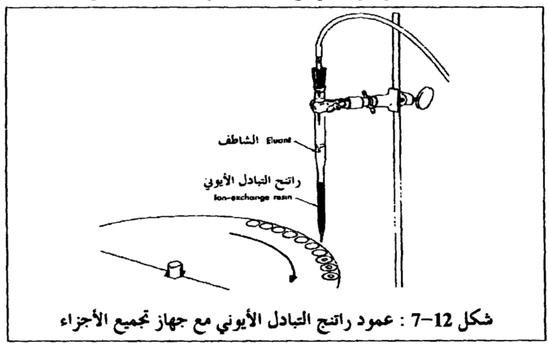
تتكون راتنجات التبادل الأيوني العضوية الصلبة من شبكة بولمرية عضوية تحتوي هذه الشبكة على مجموعات حامضية أو قاعدية مرتبطة مـع الهيكـل العضـوي. ويكتـب تفاعل الاستبدال الكلي الحاصل في المبادلات الأيونية الموجبة الحامضية كما يلي :

$$M^{n+}_{(aq)} + nRH_{(\text{راتنج})\,(resin)} \Leftrightarrow MR_{n(\text{راتنج})\,(resin)} + nH^{+}_{(aq)} \qquad (7-29)$$

$$K_{iex} = \frac{[MR_{n_{resin}}][H^{+}_{(aq)}]^{n}}{[M^{n+}]_{(aq)}[RH]^{n}_{resin}} \qquad (7-30)$$

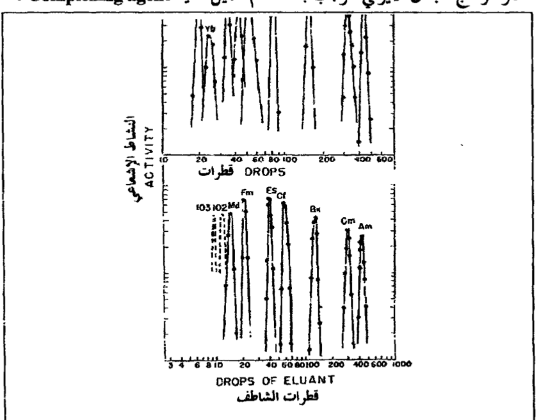
ويعتمـد ثـابت الاتـزان لهـذا التفـاعل (7-29) علـى الخـواص النوعيـة لمـادة التبادل الأيوني ، مثل كمية الوصلات المستعرضة في الشبكة البولمرية وعلى حـدود المحلول كطبيعة أيون المعدن والقوة الأيونية للمحلول ودرجة الحرارة ... إلخ .

ويزداد التمزز في الطور الراتنجي مع تكافؤ الأيـون الموجـب ، فلهـذا تمتـص الأيونات متعددة التكافؤ بقوة أكثر من ثنائية التكافؤ أو أحادية التكافؤ .



شكل 7-12 : عمود راتنج التبادل الأيوني مع جهاز تجميع الأجزاء

وعملياً تتمزز المادة المشعة في الطبقة العليا من العمود المحتوي على راتنج التبادل الأيوني الموجب أو السالب معتمدة على نوع الراتنج المستخدم . بعد ذلك يتم شطفها لإزالتها من الراتنج بمحلول يمر عبر عمود الراتنج يسمى بالشاطف (**eluant**) (شكل 12–7) . وقد يتم الشطف باستخدام أيون لمعدن آخر (مثل M^{3+}) ، والذي يؤدي إلى إزاحة اتزان تفاعل التبادل من خلال المنافسة مع M^+ على المواقع في الراتنج ، أو من خلال إضافة أيون تعقيد سالب إلى المحلول فيرتبط مع M^+ ويؤدي إلى نقصان في تركيز M^+ وهذا سيؤدي إلى إزاحة الاتزان (معادلة 29–7) إلى اليسار . ويبين الشكل (13–7) ترتيب الشطف الناتج عن فصل الأنثانيدات والأكتانيدات موجبة الشحنة من عمود راتنج التبادل الأيوني الموجب باستخدام عميل تعقيد **Complexing agent** .



شكل 13–7 : شطف أيونات اللانثانيدات والأكتانيدات الثلاثية الموجبة . استخدم راتنج التبادل الأيوني **Dowex–50** مع α–هيدروكسي أيزوبيوترات الأمونيوم كشاطف

ولقد استخدم راتنج التبادل الأيوني الموجب كثيراً في فصل وإثبات الشخصية الكيميائية للعناصر التي تأتي بعد البلوتونيوم .

3-9-7 كروماتوغرافيا الفصل العمودي

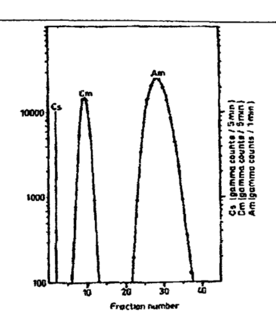
Column Partition Chromatography

ينظر العلماء إلى هذه الطريقة على أنها استخلاص سائل-سائل إلا أنها تتميز بوجود أحد أطوار السائل ثابتاً ومعلقاً بمادة داعمة والطور الآخر متحركاً .

وأما كروماتوغرافيا الفصل السائل

Liquid partition chromatography (LPC)

فإنها تنفذ من خلال ثبات أحد الأطوار ، المائي أو العضوي ، وفي حال كان الطور العضوي هو الثابت سميت هذه الطريقة بكروماتوغرافيا الفصل السائل ذو الطور العكسي **Reversed phase** ويثبت الطور المائي من خلال امتزازه على جل السليكا أو مسحوق السليلوز ... إلخ. ولتثبيت الطور العضوي تستخدم كرات صغيرة (50–200 مايكرومتر) من بولي فينيل كلورايد **PVC** أو التفلون ... إلخ . وتظهر فائدة **LPC** الطور العكسي في الكيمياء المشعة لفصل عناصر الأنثانيدات والأكتانيدات كل على حده أو عن بعضها البعض ، ويتكون الطور الثابت فيها من ثلاثي بيوتيل الفوسفات (**TBP**) أو ثنائي – 2– إيثيل هكسيل حامض الفوسفوريك (**HDEHD**) ... إلخ .



شكل 14–7 : فصل الأمريكيوم والكوريوم بواسطة كروماتوغرافيا الفصل ذو الطور العكسي ، واستخدام نترات ثلاثي لوريل أمين ($TLMANO_3$) الممتز على Kel-F مع الشاطف 4جـ $LiNO_3$ عند $pH = 2.0$

ويثبت الطور الثابت في مكان في العمود تماماً كما في التبادل الأيوني . ويبين الشكل (14–7) عملية فصل Am^{3+} من Cm^{3+} بواسطة LPC الطور العكسي . وتزداد سعة وفاعلية هذه الطريقة من خلال العمل تحت ضغط (30–400 ضغط جوي) ودرجة حرارة عالية وباستخدام داعم مقسم إلى دقائق ناعمة جداً (5–10 ميكرومتر) .

7-9-4 كروماتوغرافيا الفصل الطبقي

Sheet Partition Chromatography

تستخدم هذه الطريقة صفحة من الورق لدعم الطور الثابت (الكروماتوغرافيا الورقية) أو مادة ممتزة مطلية على لوحة من الزجاج (كروماتوغرافيا الطبقات الرقيقة) . ولهذه الطريقة ميزة على طرق الفصل بالعمود

وذلك لأنـه مـن السـهل التعرف على موقـع المواد المشعة إما بواسطة التصوير الإشعاعي الآلي أو بواسطة أجهزة المسح .

تشتمل طريقة عمل الكروماتوغرافيا الورقية على الخطوات التالية :

أ) توضع عدة قطرات من المادة المراد فصلها (أيون معدن أو جـزيء عضـوي ... إلخ) على بُعد بضع سنتمترات من نهاية القطعة الورقية .

ب) تعلق القطعة الورقية عمودياً ويغمر أسفلها بـالمحلول بحيث تكـون النقـاط الـتي وضعت في (أ) في أسفلها وفوق مستوى المحلول .

جـ) تدفع الخاصية الشعرية بالمحلول إلى أعلى إلى أن يلامس المواد الممتزة الموضوعة في (أ) .

د) تتحرك المواد من نقطة البداية مع المحلول إلى أعلـى ، وتعتمـد المسـافة المقطوعـة على نوع الورق والمحلول المستخدم والخواص الكيميائية للمادة .

ويعطى لكل مادة قيمة R_f خاصة بها وتساوي :

$$R_f = \frac{\text{المسافة التي يقطعها المركب المقصود}}{\text{المسافة التي تقطعها مقدمة السائل}} \quad (7-31)$$

ويستخدم في حال الأيونات المعدنية مخلوط من الأسـيتون و HCl المخفـف ، وأما في حـال المـواد العضويـة فيستخدم خلـوط مـن الفينـول والماء أو مـن أستيل أسيتونات والماء . ويبين الشكل (4-7) هذه الطريقة بالتفصيل .

تسـتخدم طريقـة كروماتوغرافيـا الفصـل الطبقـي الرقيــق بطريقــة (TLC) **Thin layer partition chromatography** مماثلـة للكروماتوغرافيـا الورقيـة . كما أن لها استخدام واسع لأنها غير محدودة لدعم السليلوز . وتثبت أي مادة ممتزة على شكل طبقة رقيقة (1-5 ميكرومتر) علـى لوحـة مـن الزجـاج كجـل السـليكا والسليلوز الناعم والمسحوق والألومينا ... إلخ .

كما يستخدم في بعض الأحيان مجال جهد كهربـائي لتحسـين الفصـل (إلكتروفوريسـز **electrophoresis**) وخاصة في الفصل الانتقائي للسكريات وللأحماض الأمينية .

الأسئلة :

1) أخذ 15.0 مـل مـن دم مريـض مـا وخلطـت مـع حجـم صغـير جـداً مـن $Na_2H^{32}PO_4$ ذو النشاط النوعي العالي . بعد ساعة من الخلط حيث تأخذ كريـات الدم الحمراء كل ^{32}P . أخذ 1 مل من المخلـوط فوجـد أنـه يحتـوي علـى 216000 تحلل/دقيقة (عد/دقيقة) . ثـم حقـن المريـض بخمـس مليليـتر مـن المخلـوط وانتظرنـا نصـف سـاعة ، بعدهـا سـحبت عينـة جديـدة فوجـد أن لكـل 10 مـل منهـا 2300 تحلل/دقيقة . احسب حجم الدم في جسم المريض .

2) أخذ 1 مل من مخلوط من أحماض أمينية (الكثافة 1 غم/مل) وأضيـف إليـه 2.61 ملغـم مـن السيسـتئين الموسـوم ^{32}S والـذي لـه نشـاط نوعـي 0.862 ميكروكوري/ملغم . بعد ذلك فصل 30.6 ملغم من السيستين النقـي مـن المخلـوط الكلي ووجد أن لها نشاطاً إشعاعياً يساوي 169000 تحلل/الدقيقة وبفاعلية كشـف 27٪ . ما هي نسبة السيستئين في المخلوط الأصلي ؟

3) أخذت عينة من الدهان وأذيبت في حامض النيتريك المركز ثم أضيـف إلى المحلول 5 مل من محلول ^{212}Pb . وبعد تبخير الحامض الزائد أضيفـت كميـة زائـدة من 1 جـ NaCl ثم سخن المحلول ورشح . وبعد أن برد المحلـول وتبلـور $PbCl_2$ ، أخذ 0.3276 غم من البلورات لقياس النشاط الإشعاعي فوجد أنها تعطي 185160 تحلل/ 5 دقائق . وأما 1 مـل مـن محلـول ^{212}Pb الأصلـي فلـه 57000 تحلـل/دقيقـة والإشعاع الخلفي له 362 تحلل/دقيقة . احسب نسبة Pb (الرصاص) في الدهان .

4) ما هي أصغر كمية من الأنديوم (In) يمكن تحديدها في 100 ملغم مـن الألمنيـوم باستخدام NAA والذي له فيض من النيوترونـات يسـاوي 10^{12} نيوتـرون/ثانيـة. سـم^2 . افـترض أن لــ ^{27}Al و ^{115}In نفـس القـدرة علـى إمسـاك النيوترونـات ، فلتفـاعل $^{115}In \xrightarrow{(\gamma,n)} {}^{116}In$ $(\sigma = 45b)$ ، وإن أقل نشاط لـ ^{116}In يمكـن الكشـف عنـه 10

تحلل/ثانية ، وأن لا يتعدى التشويش من ^{28}Al ما نسبته 20٪ .

5) أخذت عينة من شهب ، ودرست لتحديد كمية الجاليوم في حديد الشهب . فأخذ 373.5 ملغم من حديد الشهب (أ) و 10.32 ملغم أوكسينات الجاليوم (ب) وتم تشعيعهما في مفاعل لمدة 30 دقيقة . وبعد فترة تبريد أخذ (أ) وأذيب في HCl المركز وأضيف إليه 4.53 ملغم من Ga^{3+} غير المشع . بعد ذلك أجريت بعض الخطوات الكيميائية ونجم عن ذلك ترسيب 25.13 ملغم من أوكسينات الجاليوم (أ) . ثم أخذت العينة (ب) وأذيبت وأضيف إليها الماء إلى 50 مل ، ثم سحب 0.50 مل وأضيف إليه 4 ملغم من Ga^{3+} غير المشع ورسبت أوكسينات الجاليوم (د) ، فإذا أعطى منحنى التحلل الإشعاعي خطين مستقيمين، $\log R_{ج} = 3.401 - 0.0213t$ و $\log R_{د} = 3.445 - 0.0213t$ ، فما هي كمية الجاليوم في العينة (أ) .

6) أخذ 10 غم من إيودو البنزين وخلطت مع 100 مل من 1 جـ KI المحتوي على 2500 تحلل/دقيقة من ^{131}I لمدة ساعتين . ثم فصل إيودو البنزين فوجد أن له نشاطاً إشعاعياً يساوي 250 عد/دقيقة ، فما هي نسبة ذرات اليود في إيودو البنزين والتي تم استبدالها مع محلول اليوديد .

7) احسب ثابت التوزيع لمركب أستيل أسيتونات البلوتونيوم المتعادل بين

أ) $CHCl_3$ و 0.1 جـ $NaClO_4$.

ب) ميثل إيزوبيوتل كيتون و 0.1 جـ $NaClO_4$.

(ارجع إلى الشكل 5–7) .

8) اقترح العلماء طريقة بسيطة لحساب ثوابت الاستقرار β_n مستخدمين العلاقات التالية :

$$K_n = \frac{\beta_n}{\beta_{n-1}} = [A_a]^{-1}_{\bar{n}=n-0.5}$$

و

$$\bar{n} = N - d(\log D)/d(\log[A_a])$$

وفي حال Pu^{4+} فإن N=4 .

قدر قيم β_n مستخدماً منحنى البنزين في الشكل (5–7) .

9) أراد أحد الأشخاص حساب حجم السائل المتبقي في خزان ترسيب مغلق حجمه الكلي 80 م^3 ومستخدم في ترسيب $CaSO_4$. فأضاف 0.5 مل من $^{24}Na_2SO_4$ (نشاطه النوعي 3.2×10^8 $\frac{\text{تحلل}}{\text{دقيقة.مل}}$) إلى الخزان وبعد ساعتين من الترسيب أخذ 10 مل وقيس النشاط الإشعاعي لها فوجد أنه يساوي 500 تحلل/10 دقائق . احسب حجم السائل الحُر في الخزان .

10) احسب جهد الترسيب الحرج ($E-E^0$) لـ 10^{-12} جـ من ^{210}Bi على قطب من الذهب من معادلة نرنست ، علماً بأن النشاط الكيميائي لمعدن البزموث يساوي واحد .

11) يحتوي خام ما على اليورانيوم وكمية صغيرة من الفناديوم ، ولتحديد تركيز الفناديوم لابُد من فصله عن اليورانيوم . فإذا استخدم الاستخلاص بالمذيب و0.1 جـ 8–هيدروكسي كوينولين في الكلوروفورم ، فأي منهم سيتخلص من الآخر ؟

وعند أي درجة حموضة pH ؟ . (ارجع إلى الشكل 11–7) .

12) يحتوي أحد أنظمة الاستخلاص بالمذيب على اليورانيوم واللانثانوم في 1جـ HNO_3 و 100٪ TBP ، وكانت قيمة D_u = 20 وقيمة D_{La} = 0.07 .

فإذا كانت نسبة الأطوار $\theta = \frac{\text{حجم العضوي}}{\text{حجم المائي}} = \frac{Vorg}{Vaq} = 0.5$ ، فكم كمية اليورانيوم المستخلص من الطور المائي من خلال ثلاث عمليات استخلاص ؟ وكم كمية اللانثانوم المستخلص مع اليورانيوم ، علماً أن الجزء (الكسر) المستخلص باستخدام n حجم عضوي (V_{org}) من حجم مائي واحد (V_{aq}) يساوي :

$$E_n = 1-(1+D\theta)^{-n} \qquad (7-32)$$

الفصل الثامن
الطاقة النووية
NUCLEAR ENERGY

8-1 مقدمة

بعد أن اكتشف العلماء هامن وستراسمن وميتنر الانشطار النووي لليورانيـوم بالنيوترونات وأن عدد النيوترونات المنطلقة من الانشـطار أكـثر مـن واحـد ، فكـر الكثير منهم ببناء أنظمة تفاعل متسلسـل للحصـول علـى كميـة كبـيرة مـن الطاقـة النووية تحت ظروف مسيطر عليها . ولقد بني أول هذه الأنظمة في مدينـة شـيكاغو الأمريكية في بداية عام 1940 بقيادة العالم أي . فيرمي . وفي عام 1942 أصبح هـذا المفاعل النووي جاهزاً للعمل كجزء من مشروع منهاتن **Manhattan Project**. ومنذ ذلك الوقت بني المئات من المفاعلات النووية في جميع أنحـاء العـالم للأبحـاث أو لإنتاج البلوتونيوم أو لإنتاج الطاقة . ولقد بلغ عدد محطـات توليـد الطاقـة النوويـة 218 في عام 1978 وبقوة 103 GWe ، وموزعة كالآتي : 69 في الولايات المتحدة الأمريكيـة (486 GWe) و82 في أوروبـا الغربيـة (30 GWe) و27 في مـا كــان يعرف بالاتحاد السوفياتي (7 GWe) . وهناك الآن 380 محطة (360 GWe) تحـت البناء أو التصميم .

ولقد بلغت مساهمة الطاقة النووية في إنتاج الكهرباء بحوالي 22٪ في السويد و17٪ في الولايات المتحدة و7٪ في المملكة المتحدة . ولقد وقعت بعـض الحـوادث المميتة في هذه المحطات منها مـا حـدث في محطـة جزيـرة الأميـال الثلاثـة (الولايـات المتحدة) ومحطة تشرنوبل (الاتحاد السوفياتي سابقاً وأوكرانيا اليوم) .

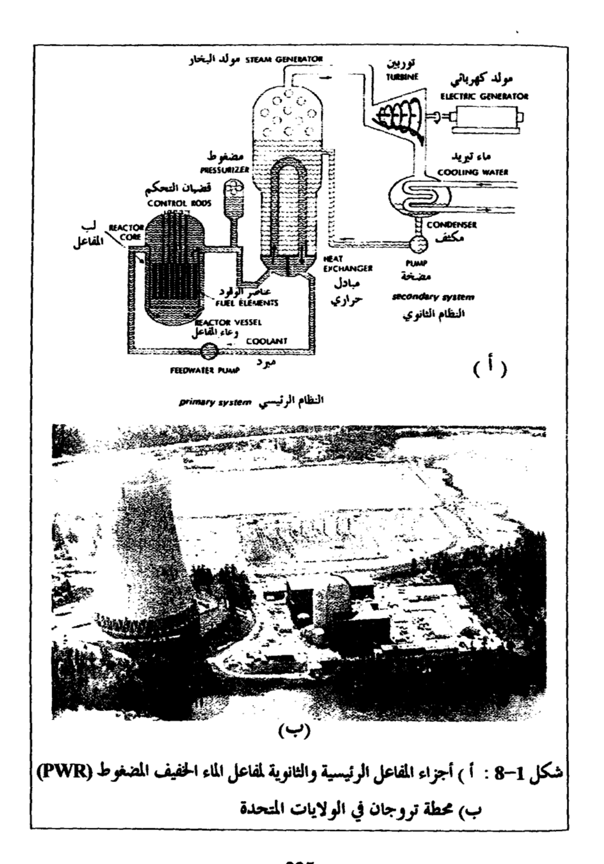
8-2 المفاعل النووي The Nuclear Reactor

إذا تمعنا النظر في تفاعل الانشطار التالي :

$$^{235}U + n \rightarrow FP + \nu n \qquad (8-1)$$

وجدنا أن هناك زيادة في عدد النيوترونات في النواتج ، فمقابل كل نيوترون يستهلك ينتج في المعدل حوالي 2.5 نيوترون ($\nu = 2.5$) . ويمكن استخدام النيوترونات الجديدة في انشطار ذرات أخرى من ^{235}U مما سيؤدي إلى إنتاج المزيد من النيوترونات . ويتم التحكم في تفاعلات الانشطار المتسلسل التي تجري في المفاعلات النووية ، أي أن هناك حالة من الاتزان فمقابل كل انشطار يُستخدم نيوترون واحد فقط من النيوترونات الجديدة لمزيد من الانشطار ، أي أن معامل التكاثر للنيوترونات K في هذه الظروف يساوي واحد . وإذا ازداد المعامل ازداد عدد النيوترونات وبالتالي سرعة الانشطار زيادة أسية . وفي حال غياب آلية للتحكم فإن الحرارة الناتجة ستدمر في النهاية نظام التفاعل المتسلسل والمفاعل النووي كما حدث في محطة تشرنوبل . فلا بُد من توفر عدة آلياتٍ للتحكم في المفاعلات النووية للمحافظة على السلامة . ولا تستخدم هذه الآليات في الأسلحة النووية التي يسعى صانعوها لجعل تفاعلاتها أشد عنفاً .

وهناك مرونة كبيرة في اختيار التصميم لتفاعل التسلسل النووي المتحكم به وذلك لأن لكل من التصاميم فوائد وعيوب . وفي الواقع هناك أكثر من 12 نوعاً من محطات الطاقة النووية تم تطويرها وتعمل بشكل ممتاز . 90٪ منها مفاعلات ماء خفيف (LWR) Light Water Reactor . وسوف ندرس مبدأ ومكونات هذا النوع بالتفصيل . ويبين الشكل (1–8) مخطط وصورة لمفاعل ماء خفيف . والمكون الرئيسي لأي مفاعل يسمى بلب المفاعل الذي يحتوي على الوقود النووي القابل للانشطار . ويتكون هذا الوقود عادة من UO_2 المخصب باليورانيوم–235 ^{235}U إلى 2–3٪ والموضوع في قضبان مغلقة بسبيكة من الزركونيوم . وترتبط قضبان الوقود في مجموعات مكونة عناصر الوقود أو مكان التجميع .



شكل 1–8 : أ) أجزاء المفاعل الرئيسية والثانوية لمفاعل الماء الخفيف المضغوط (PWR)

ب) محطة تروجان في الولايات المتحدة

تنطلق نواتج الانشطار بعد حدوثه في الوقود النووي بطاقة حركيـة عاليـة تخسرها من خلال التصادمات مع ذرات المواد المحيطـة بهـا ، وهـذا سيؤدي إلى تحويل الطاقة من حركية إلى حراريـة . ومـن أجـل المحافظـة علـى درجـة حـرارة تشغيل مسـتقرة في المفـاعل لابُـد مـن اسـتخدام مـا يعـرف بالمبرد Coolant . وتستخدم مفاعلات الماء الخفيف "الماء الخفيف" H_2O كمبرد يدخل مـن أسـفل لب المفاعل ويسخن من خلال مروره على طول قضبـان الوقـود ثـم يخـرج مـن أعلى اللب على هيئة ماء ساخن سخونة زائدة كما في مفاعلات المـاء المضغـوط Pressurized Water Reactors (PWR) (شـكل 1−8) أو علـى هيئـة بخار ماء له درجـة حـرارة عاليـة كمـا في مفـاعلات المـاء المغلـي (BWR) Boiling Water Reactor ويتولد البخار في BWR في مبـادل حـراري منفصل . ويدير البخار النـاتج توربينـات موصولـة إلى مولـدات كهربائيـة ومـن ثـم يتكشـف في نظـام تـبريد خـارجي موجـود في الجهـة الخلفيـة مـن التوربينات . وقـد يكـون نظـام التـبريد الخـارجي نهـر أو بحـيرة أو أبـراج تبريد. ويتكون نظام جريان الماء والبخار من دورات مغلقة كما في الشكل . (8−1)

وتستخدم للتحكم قضبان مصنوعة من مواد كالكادميوم تمكن مـن السيطرة على سرعة الانشطار المتسلسل النووي . وذلك لأن هـذه المواد قـدرة عاليـة على الإمساك بالنيوترونات وإبطاء التفاعل المتسلسل .

ومن أجل الحصول على الحـد الأقصـى لمقطـع الانشـطار المسـتعرض والـذي يصل إلى أعلى قيمة له عندما تكون النيوترونات ذات طاقة منخفضة ، ولهذا فلا بُد من أن نبطء النيوترونات ذات الطاقـة العاليـة بواسـطة مـواد مهدئـة Moderator

والتي تعمل على التشتت المرن للنيوترونات دون الإمساك بها . ويقوم الماء في مفاعلات الماء الخفيف LWR's بالتبريد والتهدئة في وقت واحد .

وتستخدم بعض أنواع المفاعلات النووية الأخرى مواداً مهدئة صلبة كالغرافيت ووسط تبريد غازي كالهيليوم . وتسمى المفاعلات التي يكون فيها فصل مادي بين الوقود والمهدئ بالمفاعلات غير المتجانسة ، والمفاعلات التي يذوب فيها الوقود مباشرة بالمواد المهدئة بالمفاعلات المتجانسة .

يُطوّق نظام لب المفاعل بخزان من الفولاذ ، كما يحاط خزان المفاعل بدرع بيولوجي سميك لحماية العاملين فيه من النيوترونات وإشعاعات جاما المنطلقة من الانشطار . ويُطوق مبنى المفاعل تماماً من جميع الجهات ببناء خارجي لمنع تسرب أي نشاط إشعاعي ينجم عن أي حادث طارئ إلى المنطقة المحيطة بالمفاعل . كما تتم مراقبة وتنقية مخرجات المفاعل من ماء وهواء من الملوثات المشعة .

ولا يستهلك الوقود النووي ^{235}U 100٪ في المفاعلات . ويؤدي الانشطار إلى إنتاج نواتج الانشطار ، ولبعض هذه النواتج مقطع عرضي لإمساك النيوترونات عالٍ جداً (>b100) أي أنها ستنافس تفاعل الانشطار المتسلسل على النيوترونات. وقبل أن يصل المفاعل إلى حالة التسمم من قبل نواتج الانشطار هذه، لابُد من تغيير عناصر الوقود في المفاعل ، وتتم عملية التغيير بواسطة آلة شحن الوقود . ونظراً لوجود كميات كبيرة من نواتج الانشطار المشعة يسمح لعناصر الوقود المستعملة بأن تبرد لعدة أشهر (وذلك بالنسبة للحرارة والنشاط الإشعاعي) في أحواض تخزين مملوءة بالماء وموجودة في مبنى المفاعل (شكل 1–8).

وقد تستخدم عناصر الوقود المستعملة بعد ذلك في ما يسمى بعملية إعادة التصنيع أو المعالجة Reprocessing لاستعادة الكمية المتبقية من المواد الانشطارية وأي مواد قابلة للانشطار ، ونعني بالمواد القابلة للانشطار هي تلك الذرات التي قد تتحول إلى ذرات قابلة للانشطار من خلال الإمساك أو التقاط النيوترونات الناتجة عن الانشطار مثل $^{232}_{90}Th \xrightarrow{\beta^-,\beta^-,n} {}^{233}_{92}U$ و $^{238}_{92}U \xrightarrow{\beta^-,\beta^-,n} {}^{239}_{40}Pu$.

تفصل عملية المعالجة الكيميائية نواتج الانشطار ، والتي قد يكون لبعضها أهيمة كبيرة لتعزل . ومع ذلك فتخزن معظم نواتج الانشطار كفضلات نووية مشعة . وأما المواد الانشطارية التي تم استردادها فيعاد استخدامها كعناصر وقود نووي .

8-2 انطلاق الطاقة في الانشطار

Energy Release in Fission

إذا أمعنا النظر في الانشطار لليورانيوم 235 بالنيوترونات الحرارية تبين لنا ما يلي :

طاقة شظايا الانشطار الحركية 165 MeV (في المعدل) .

طاقة 2.5 نيوترون (فوري) الحركية 5 MeV .

طاقة أشعة جاما الفورية 7 MeV (في المعدل) .

أي أن مجموع الطاقة المنطلقة الفورية حوالي 177 MeV ، وهذه الطاقة تمتص من قبل المواد المحيطة بالانشطار . جدول (8–1) .

	232U	233U	235U	238U	Nat. U	239Pu	240Pu	241Pu
Radioactive decay التحلل الإشعاعي	α	α	α	α		α	α, sf	α, sf
Half-life (years) نصف العمر (سنة)	1.405×10^{10}	1.59×10^{5}	7.04×10^{8}	4.47×10^{9}	-	2.44×10^{4}	6.54×10^{3}	14.9
Specific rad. act. (dps μg^{-1}) النشاط النوعي	4.06×10^{-3}	357	0.0800	0.01244		2270	8430	3.69×10^{6}
Thermal neutrons (0.025 eV) النيوترونات الحرارية								
n, γ-capture (σ_γ barns) التقاط γ و n	7.40	48	99	2.70	3.42	269	290	368
fission (σ_f barns) انشطار	-	531	582	< 0.5 mb	4.18	742	0.030	1009
neutron yield (ν) عدد النيوترونات الناتجة	-	2.49	2.42	-		2.87	2.90	3.00
fission factor (η) عامل الانشطار	-	2.29	2.07	-	1.33	2.11		2.15
Fast neutrons (~0.25; ~1.0 MeV) النيوترونات السريعة								
n, γ-capture (σ_γ barns) التقاط γ و n	0.18; 0.15	0.39; 0.08	0.24; 0.11	0.14; 0.17	0.16; 0.18	0.27; 0.09	0.20; 0.18	
fission (σ_f barns) انشطار		2.25; 1.95	1.35; 1.25	0.017	0.11	1.62; 1.65	0.11; 1.59	1.96; 1.65
neutron yield (ν) عدد النيوترونات الناتجة		2.52; 2.59	2.49; 2.58	2.85		2.93; 3.02		2.47; 3.3
fission factor (η) عامل الانشطار		2.29; 2.45	2.12; 2.39			2.53; 2.88		

جدول 1–8 : النوى القابلة للانشطار والمعلومات الخاصة بها .

تتميز نواتج الانشطار بأن لها نشاطاً إشعاعياً وأنها تتحلل من خلال إطلاقها لأشعة بيتا وجاما وإكس ، وتقدر طاقة التحلل الكلية لها بحوالي 23 MeV . يتسرب منها حوالي 10 MeV على شكل إشعاعات خارج المفاعل ويبقى حوالي 1 MeV من طاقة التحلل في قضبان الوقود في المفاعل ، وأما الباقي والذي يقدر بحوالي 12 MeV من طاقة تحلل بيتا وجاما والمقسوم تقريباً بالتساوي بين $\overline{E}_B$ و E_γ فيمتص في المفاعل . كما تلتقط النيوترونات الفورية من قبل مادة المفاعل مطلقة طاقة ربطها والتي تقدر بحوالي 10 MeV . وبهذا فإن كمية الطاقة المنطلقة من كل انشطار تساوي تقريباً = 177 + 12 + 10 =~ 199 MeV . وأما معدل القيمة العملي المستخدم فيساوي 200 MeV/انشطار .

$$E_f = 200\ \text{MeV/انشطار} = 3.20\times10^{-11}\ \text{جول} \qquad (8-2)$$

وعلى هذا فإن $\frac{1}{3.2\times10^{-11}} \approx 3.1\times10^{10}$ انشطار/ثانية .

وهذا سيؤدي إلى إنتاج واحد واط من حرارة المفاعل . وتكتب معادلة الطاقة الحرارية لمفاعل كما يلي :

$$P = E_f \Delta N_f / \Delta t \qquad (8-3)$$

حيث أن $\frac{\Delta N_f}{\Delta t}$ عدد الانشطارات في الثانية . فإذا أنتجت محطة طاقة نووية 3 غيغا واط من الحرارة (أو GW_{Th}) (Thermal = Th = حراري) نتج عن ذلك (1 GWe) واحد غيغا واط من الطاقة الكهربائية ، أي بفعالية 33٪ . ويقدر عدد الانشطارات اللازمة لذلك بحوالي 8.1×10^{24} انشطار/اليوم . وبما أن كتلة ذرة اليورانيوم تساوي = $\frac{M}{N_A} = 3.9\times10^{-22}$ غم ، فإن كتلة اليورانيوم المنشطرة ستساوي : $8.1\times10^{24}\times3.9\times10^{-22} = 3160$ غم ^{235}U/اليوم .

والكمية الحقيقية المستهلكة أعلى من هذا بقليل .

8-3 احتمالية الانشطار Fission Probability

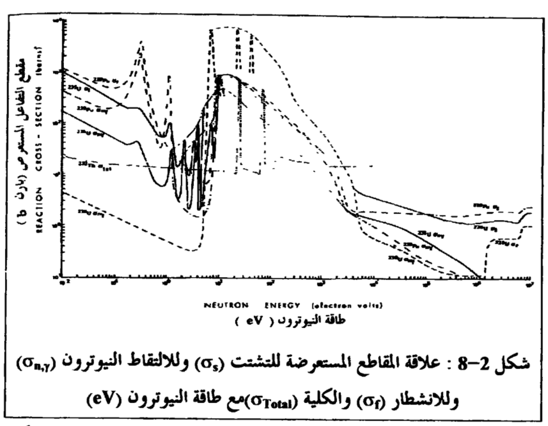
نتيجة لتشعيع اليورانيوم بالنيوترونات تحدث عدة تفاعلات بالإضافة إلى التقاط النيوترون والانشطار (n,f) مثل التشتت و(n,γ) و (n,2n) ... إلخ . وهذه التفاعلات كلها مهمة لمصمم المفاعل وللكيميائي النووي الذي سيتولى عملية التعامل مع عناصر الوقود النووي المستعمل . وتعتمد احتمالية حدوث أي من هذه التفاعلات على طاقة النيوترون ، ويوضح الشكل (2–8) وجود ثلاث مناطق هي:

1) إذا كان معدل الطاقة الحركية للنيوترونات الحرارية $\overline{E}_n \leq 1eV$ هيمن انشطار ^{235}U و ^{239}Pu على التقاط النيوترونات ($\sigma_f > \sigma_{n,\gamma}$) . وعلى الرغم من أن $\sigma_{n,\gamma}$ لليورانيوم 238 صغير إلا أنه يحدث نتيجة لنسبة ^{238}U العالية .

2) يحدث للنيوترونات فوق الحرارية ($1 \leq \overline{E}_n \leq 10^5 eV$) التقاط مصحوباً بانطلاق إشعاعات كثيرة ورنين انشطاري . ففي هذه المنطقة تتكون نظائر أثقل من خلال تفاعلات (n,γ) ومن الأمثلة على ذلك :

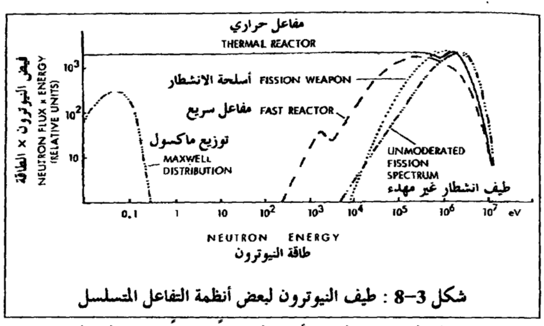
$^{235}U\ (n, \gamma)\ ^{236}U$
$^{238}U\ (n, \gamma)\ ^{239}U$
$^{239}Pu\ (n, \gamma)\ ^{240}Pu$

3) وأما النيوترونات السريعة ($\overline{E}_n \geq 0.1MeV$) فلها مقاطع مستعرضة صغيرة نسبياً ($1b \geq \sigma$) . ويهيمن الانشطار على الالتقاط المصحوب بالإشعاعات . وتصبح قابلية ^{238}U للانشطار أعلى كلما ازدادت طاقة النيوترونات .



شكل 2–8 : علاقة المقاطع المستعرضة للتشتت (σ_s) وللالتقاط النيوترون ($\sigma_{n,\gamma}$) وللانشطار (σ_f) والكلية (σ_{Total})مع طاقة النيوترون (eV)

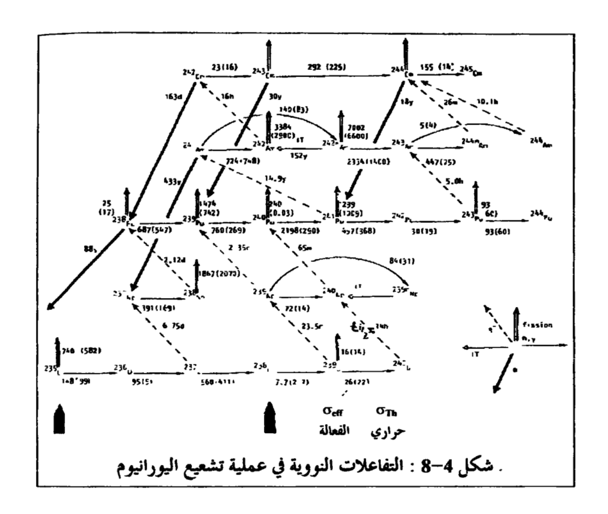
ومن الواضح أن لطيف النيوترون دور أساسي في المفاعل . ويبين الشكل (3–8) طيف النيوترونات الفورية (غير المهدئة) الناتجة عن الانشطار والتي لها معدل طاقة يساوي $\overline{E}_n \sim 2MeV$. ويحدث غالبية الانشطار في الأسلحة النووية بواسطة النيوترونات السريعة ، كما يمكن تصميم وبناء المفاعلات النووية ، بحيث تستخدم النيوترونات بشكل رئيسي في الانشطار ، السريعة أو الحرارية منها . ويؤدي هذا إلى مفهومين مختلفين للمفاعلات ، أولهما المفاعل السريع وثانيهما المفاعل الحراري . ويوضح الشكل (3–8) طيف النيوترونات التقريبي لكل منهما. ولسوف ندرس المفاعلات الحرارية لأهميتها في وقتنا الحاضر .



شكل 3–8 : طيف النيوترون لبعض أنظمة التفاعل المتسلسل

يفترض في المفاعلات الحرارية أن هناك اتزاناً حرارياً بين معظم النيوترونات وذرات المهدئ ، وفي واقع الأمر فإن لطيف النيوترون في مفاعلات الطاقة طاقة أكبر . ومن العلاقة $E_n = kT$ نجد قيمة $\overline{E}_n$ عند درجة حرارة 300°م في مفاعل الماء الخفيف والتي تساوي 0.05 eV (شكل 3–8) . ومع ذلك فإن المقاطع المستعرضة لطاقة النيوترونات الحرارية (E_{th}) قد تم معايرتها للنيوترونات أحادية الطاقة ذات سرعة 2200 م/ث . وهذا يقابل قيمة لـ $E_n = 0.025$ eV .

ويبين الجدول (1–8) قيم المقاطع المستعرضة عند تلك الطاقة . وتقدر المقاطع المستعرضة لمعظم الأنوية وليس لكلها عند قيم الطاقة المنخفضة للنيوترونات وخارج منطقة الرنين من القاعدة $\frac{1}{v}$ حيث أن $\left(\sigma \; \alpha \frac{1}{v_{\text{السرعة}}}\right)$. ونظراً لعدم وجود طيف طاقة واضح للنيوترونات الحرارية في المفاعلات الحرارية فلا بُد من استخدام المقاطع العرضية الفعالة لحساب المحصول الناتج من المفاعلات . وتتفاوت المقاطع المستعرضة من مفاعل إلى آخر . ويوضح الشكل (4–8) المقاطع المستعرضة الفعالة لمفاعل الماء الخفيف LWR المعروف .



شكل 4–8 : التفاعلات النووية في عملية تشعيع اليورانيوم .

8-4 عامل الانشطار Fission Factor

يستهلك ^{235}U في المفاعلات الحرارية بطريقتين ، الأولى الانشطار والثانية الالتقاط المصحوب بالإشعاعات

$$^{235}U + n \begin{cases} \xrightarrow[582b]{\sigma_f} \text{نواتج الانشطار (FP)} + \nu n \\ \xrightarrow[99b]{\sigma_\gamma} {}^{236}U \xrightarrow{\alpha} \end{cases} \qquad (8-4)$$

ويتحلل ^{236}U من خلال دقائق ألفا ، ونظراً لطول نصف عمره الذي يبلغ 2.3×10^{7} سنة فإنه يتجمع في المفاعل . وقد يلتقط ^{236}U نيوتروناً فيكون $^{237}_{92}U$

والذي يتحلل في خــلال عـدة أيـام معطيـاً $^{237}_{93}Np$. ويعتمـد عـدد النيوترونـات ν الناتج مـن كـل انشـطار علـى طاقـة النيوتـرون ، وتقـدر قيمـة ν في انشـطار ^{235}U الحراري بـ 2.42 نيوترون (الجدول 1–8) .

وإذا عرفنا النسبة التالية :

$$\alpha = \frac{\sigma_\gamma}{\sigma_f} = \frac{\hat{\sum}\gamma}{\hat{\sum}f} \qquad (8\text{–}5)$$

فإن احتمالية أن يؤدي التقاط النيوترون إلى انشطار تساوي :

$$\sigma_f \big/ \left(\sigma_f + \sigma_\gamma\right) = \frac{1}{1+\alpha} \qquad (8\text{–}6)$$

وإن عدد النيوترونات الناتج عن كل التقاط لنيوترون هو :

$$\eta = \frac{\nu}{1+\alpha} \qquad (8\text{–}7)$$

حيـث أن η هـو النـاتج النيوترونـي لكـل امتصـاص أو عـامل الانشـطار . ويتطلب التفاعل المتسلسل بشكل رئيسي قيمـة لعامل الانشـطار أكثر مـن واحـد ($\eta>1$) . ويحتوي الجدول (1–8) على قيـم عـامل الانشـطار للنوى المهمـة . فإذا استخدمنا النيوترونات الحراريـة كـانت أعلـى قيمـة لـ η هـي 2.29 في ^{233}U وإذا استخدمنا النيوترونات السريعة كانت أعلى قيمة لـ η هي 2.88 في ^{239}Pu .

وفي حال كانت هناك خليط من النظائر فلابُد من اسـتخدام المقطـع العرضـي الماكروسـكوبي $\hat{\sum}$ في حســاب α (معادلـة 5–8) . فقيمـة $\hat{\sum}f$ لليورانيــوم الطبيعــي هــي $\hat{\sum}f = 0.71\times582$ لكــل 100 وقيمـــة $\hat{\sum}\gamma = (0.71\times99 + 99.3\times2.70)$ لكل 100 ، فنحصل على قيمة لـ $\alpha = 0.82$ و $\eta = 1.33$ ، وهـذا يعني إمكانية حدوث التفاعل المتسلسل في اليورانيوم الطبيعي .

8-5 الانشطار النووي Nuclear Fission

يعتبر الانشطار النووي من التفاعلات النووية الفريدة ، حيث تنقسم النواة إلى قسمين متساويين أو غير متساويين وتنطلق كمية كبيرة من الطاقة تقدر بحوالي 200 MeV/انشطار . ومن أهم جوانب الانشطار التي درست بالتفصيل ، توزيع الكتلة والشحنة بين الشظايا المتكونة في الانشطار . وبغض النظر عن كيفية حدوث الانشطار تتكون شظايا ذات كتل مختلفة وهذا يؤدي إلى إنتاج عناصر كيميائية تتراوح من الخفيف كالزنك ($Z = 30$) Zn إلى الثقيل كالجادولينيوم ($Z = 64$) Gd وبأنصاف عمر تتراوح من أجزاء من الثانية إلى ملايين السنين . ولقد تم التعرف على حوالي 400 نواة مختلفة من انشطار ^{235}U بالنيوترونات . وتحتاج دراسة نواتج الانشطار إلى عمل كيميائي إشعاعي مكثف ، وهذا المجال من المجالات البحثية النشطة ، ومن أهم المشاكل البحثية قياس النواتج ذات نصف العمر القصير جداً .

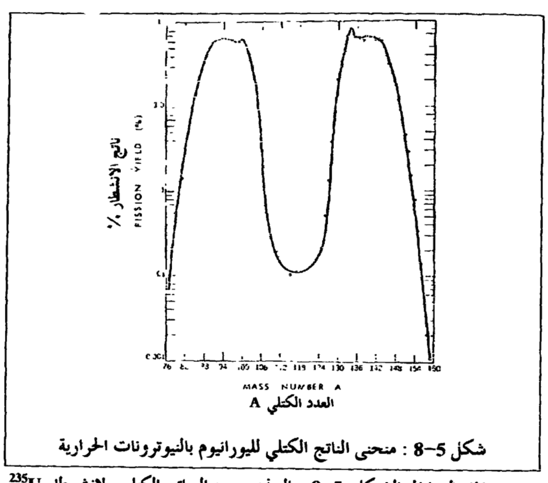
وعلى الرغم من كون الانشطار عملية معقدة جداً تتحدى العلماء النظريين باستمرار فقد ظهرت بعض النماذج المرضية والمقنعة لمعظم ظواهر الانشطار .

8-5-1 توزيع الكتلة والشحنة

Mass and Charge Distribution

هناك نوعان من الانشطار : الانشطار المتماثل (Symmetric) وغير المتماثل (Asymmetric) . ففي الانشطار المتماثل تنقسم النواة المنشطرة إلى شظيتين متساويتين في الكتلة والشحنة ، ومن الأمثلة على ذلك انشطار ^{235}U بالنيوترونات الحرارية ليعطي نواتي $^{118}_{46}Pd$ حسب المعادلة التالية :

$$^{235}_{92}U + n \rightarrow 2\,^{118}_{46}Pd \qquad (8-8)$$



شكل 5–8 : منحنى الناتج الكتلي لليورانيوم بالنيوترونات الحرارية

وإذا نظرنا إلى الشكل (5–8) والذي يبين الناتج الكتلي لانشطار ^{235}U بالنيوترونات الحرارية تبين لنا أن هناك حدين أعليين وحد أدنى . الحد الأعلى الأول بالقرب من العدد الكتلي $A_1 = 97$ (بالقرب من الرقم السحري $N = 50$) والثاني بالقرب من العدد الكتلي $A_2 = 137$ (بالقرب من الرقم السحري $N = 82$) . وتتكون هاتان الكتلتان في الانقسام غير المتماثل $(A_1 \neq A_2)$ الأكثر احتمالية. وأما الحد الأدنى والذي يمثل الانشطار المتماثل $(A_1 = A_2)$ النادر حصوله في انشطار ^{235}U بالنيوترونات الحرارية . فناتج الانشطار للعدد الكتلي $A = 115$ هو 0.01٪ بالمقارنة مع 6٪ للعدد الكتلي $A_1 = 97$ و $A_2 = 137$. وبما أن هناك ناتجي انشطار من كل انشطار ، فإن مجموع الناتج الكلي المئوي لكل نواتج الانشطار يجب أن يساوي 200٪ . ويوضح

الشكل (8–5) أن لناتجي الانشطار المكملين لبعضهم البعض A_1 , A_2 نفس قيم الناتج الكتلي وموقعين متماثلين حول الحد الأدنى . وإن مجموع $A_1 + A_2 = 234$ وليس 236 بسبب النيوترونات الفورية المنطلقة ($\nu \approx 2.5$ نيوترون) ويزداد عدد النيوترونات المنطلقة كلما ازداد العدد الذري Z للنواة المنشطرة وطاقة القذف للدقيقة المتسببة في الانشطار ، ويعزى انطلاق النيوترونات الفورية إلى اختلاف النسبة $\frac{n}{p}$ في ^{236}U والتي تساوي 1.6 مع نفس النسبة الضرورية للاستقرار في العناصر الناتجة عن الانشطار والتي تساوي 1.2–1.4 . إلا أن عدد النيوترونات المنطلقة غير كاف لتقليل نسبة $\frac{n}{p}$ إلى القيم المستقرة . ولهذا تمر نواتج الانشطار بعدة خطوات تحلل إشعاعي تنطلق فيها دقائق بيتا وتحافظ على العدد الكتلي A كما درسنا سابقاً في الفصل الثالث . ومن الأمثلة على ذلك العدد الكتلي A = 137 ، فأول نواة تم قياسها ضمن الأيزوبار A = 137 هي ^{137}Te التي تتحلل كما يلي :

$$^{137}_{52}Te \xrightarrow{3.5s} {}^{137}_{53}I \xrightarrow{24s} {}^{137}_{54}Xe \xrightarrow{3.8\,min} {}^{137}_{55}Cs \xrightarrow{30.1y} {}^{137}_{56}Ba \text{ (مستقرة)}$$

ويبلغ الناتج الانشطاري لهذا الأيزوبار (A = 137) 6.26٪ .

ناتج الانشطار المباشر ← $\sim 1\times10^{-7}$, $\sim 6\times10^{-5}$, 0.016 , 0.32 , 0.59 , 0.074 , $\sim 8\times10^{-4}$

$$^{93}_{35}Br \xrightarrow{?} {}^{93}_{36}Kr \xrightarrow{1.3\,s} {}^{93}_{37}Rb \xrightarrow{5.8\,s} {}^{93}_{38}Sr \xrightarrow{7.5\,min} {}^{93}_{39}Y \xrightarrow{10.2\,h} {}^{93}_{40}Zr \xrightarrow{9.5\,10^{5}\,y} {}^{93}_{41}Nb \text{ (stable)}$$

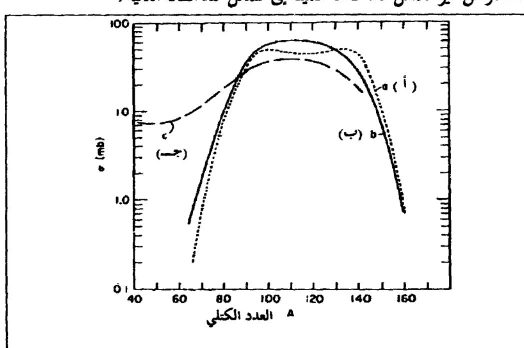
Total chain yield = 6.4 ± 0.3 %.
ناتج الانشطار الكلي للأيزوبار A = 93

شكل 8–6 : سلسلة التحلل للأيزوبار A = 93 الناتج عن الانشطار

كما استطاع العلماء قياس الناتج الانشطاري لكل نظير حسب عدده الذري ضمن الأيزوبار ويوضح الشكل (8–6) هذا لـ A = 93 . ويلاحظ من الشكل (8–6) أن هناك توزيعاً بطريقة جاوس للشحنات وأن هناك إزاحة لعدة وحدات تحت

قيمة Z للنواة المستقرة لقيمة الحد الأعلى لمنحنى جاوس . ويبلغ الناتج أعلى قيمة له في $^{93}_{37}Rb$ (0.59) بينما العدد الذري للنواة المستقرة يساوي 41 في $^{93}_{41}Nb$.

وبعد ذلك تمكن العلماء من شطر العناصر الأثقل من اليورانيوم وذلك بقذفها بدقائق عالية الطاقة كالبروتونات التي تمت مسارعتها إلى طاقة عالية . ولقد أثار منحنى التوزيع الكتلي لهذا النوع من الانشطار اهتمام العلماء والمختصين . فإذا كانت طاقة المقذوفة قليلة نتج عن ذلك انشطار غير متماثل شبيه بانشطار ^{235}U بالنيوترونات الحرارية ، وأما إذا ازدادت طاقة المقذوفة قلت ضحالة الوادي الموجود بين القمتين شيئاً فشيئاً إلى أن نصل إلى منحنى متماثل ذو سنامة واحدة (الشكل 7–8) . أي أن هناك تغيراً في أسلوب أو شكل الانشطار من غير متماثل عند الطاقة القليلة إلى متماثل عند الطاقة العالية .



شكل 7–8 : منحنيات الناتج الكتلي لنواتج الانشطار الناجمة عن تشعيع اليورانيوم بالبروتونات المختلفة الطاقة .

أ) MeV 100 ب) MeV 170 جـ) GeV 2.9

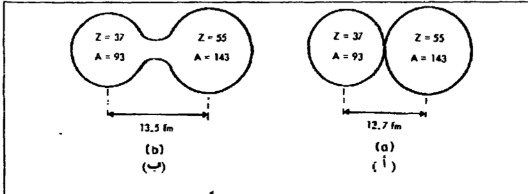
8-5-2 طاقة التنافر الكولومبي (الإلكتروستاتيكي) في الانشطار
Coulombic Repulsion Energy in Fission

تحدثنا سابقاً في الفصل الثاني وفي (2–8) عن انطلاق حوالي 200 MeV من الطاقة نتيجة لانشطار العناصر الثقيلة كاليورانيوم–235 . وتقدر الطاقة الحركية لشظايا الانشطار بـ 165 MeV . وتفسر هذه القيمة من خلال احتساب طاقة التنافر الكولومبي بين زوج الذرات الناتج عن الانشطار . وسوف ندرس الزوج التالي : $^{93}_{37}Rb$ و $^{143}_{55}Cs$. وسنستخدم النموذج المبني على أن هناك نواتين كرويتين متلامستين والمسافة بين مركزيهما d = 12.7 fm (الشكل 8–8أ) ، وتستخدم المعادلة التالية :

$$E_{coul} = -\frac{Z_1 Z_2 e^2 k}{d} \quad \text{(طاقة وضع)} \qquad (8-9)$$

(k ثابت قيمته $8.99\times10^9\ \frac{Nm^2}{C^2}$)

في حساب طاقة التنافر عند d = 12.7 fm والتي تساوي 175 MeV ، وإذا تم تطوير النموذج ليشمل وجود عنق بين النواتين (الشكل 8–8 ب) فستزداد المسافة بين المركزين لتصل إلى d = 13.5 fm وبالتعويض بهذه القيمة في المعادلة (8–9) حصلنا على طاقة تنافر (الطاقة الحركية للانفصال) تساوي 165 MeV وتتفق مع التجارب . وهناك عدة إثباتات على وجود الاستطالة في الشكل وتكون عنق في وقت الانفصال بين النواتين (الشكل 8–8 ب) .



شكل 8–8 : الانشطار غير المتماثل لليورانيوم–236 مبيناً المسافة الفعلية بين مركزي الشحنة

أ) كرتين متلامستين ب) تكون العنق قبل الانفصال

8-5-3 نماذج الانشطار Fissions Models

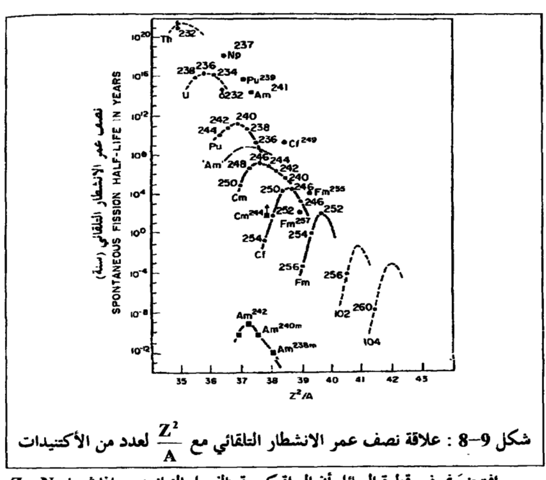
درسنا في الفصل الثاني عن العلاقة بين النواة وقطرة السائل ولقد استخدم العالمان ن.بوهر و ج.ويلر هذه الحقيقة في تفسير الانشطار .وتتخذ قطرات السائل الشكل الكروي بسبب وجود ظاهرة التوتر السطحي في ذلك السائل .

ويمكن أن نشوه هذا الشكل بطريقة ما من خلال تزويده بالطاقة . وفي حال كانت قوة التوتر السطحي الجذابة أكبر من قوة التشويه ، تأرجحت القطرة بين الشكل الكروي والشكل المطال . وأما إذا حدث العكس فستتعدى استطالة القطرة النقطة العتبية لتنفلق (تنشطر) .

ذكرنا في الفصل الثاني كيف تتناسب قوة التنافر بين البروتونات في النواة مع $\frac{Z^2}{A^{1/3}}$ وكيف تتناسب قوى التوتر السطحي مع $A^{2/3}$. كما تسعى قوة التنافر الكولومبي إلى تشويه النواة بنفس الطريقة التي قد تؤثر فيها قوة تشويه على قطرة سائل ما ، بينما تسعى قوة التوتر السطحي لتبقيها كروية . وتقيس النسبة بين هاتين القوتين المتعاكستين مدى عدم استقرار النواة نحو الانشطار :

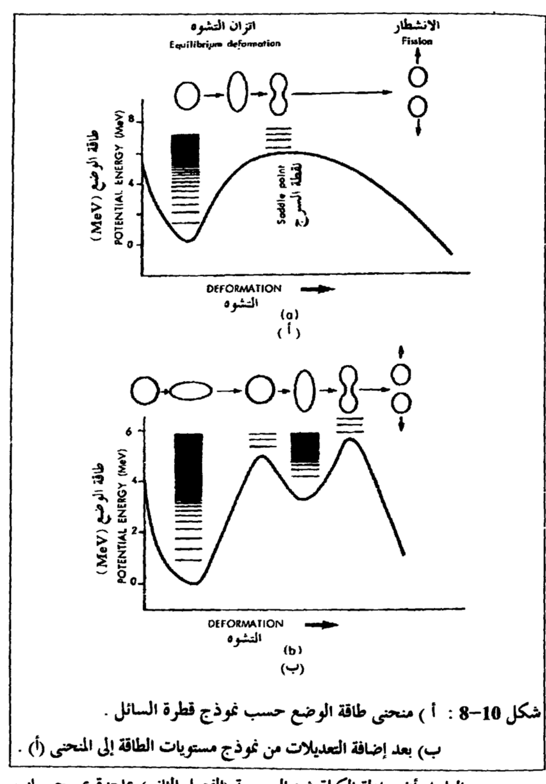
$$\frac{Z^2}{A} = \frac{Z^2/A^{1/3}}{A^{2/3}} = \frac{\text{طاقة التنافر}}{\text{طاقة التجاذب}} \ \alpha \ \text{عدم الاستقرار} \qquad (8-10)$$

ويسمى المقدار $\frac{Z^2}{A}$ بحد الانشطار ، وتتنبأ نظرية قطرة السائل بازدياد احتمالية الانشطار كلما ازداد $\frac{Z^2}{A}$. ويتميز ^{235}U عن بقية الأنوية الموجودة في الطبيعة بقابليته على الانشطار بالنيوترونات الحرارية ، بينما يحتاج ^{238}U نيوترونات ذات طاقة عالية ($\leq$ 2MeV) . وكلما ازداد العدد الذري ($92<Z$) ازدادت احتمالية الانشطار بالنيوترونات الحرارية ونقص نصف عمر التحلل بالانشطار التلقائي . وتزداد احتمالية كل منهما في العناصر ذات العدد الذري الزوجي أكثر من العدد الفردي . ويبين الشكل (8-9) العلاقة بين نصف عمر التحلل بالانشطار التلقائي وحد الانشطار .



شكل 9–8 : علاقة نصف عمر الانشطار التلقائي مع $\frac{Z^2}{A}$ لعدد من الأكتنيدات

افترضَ نموذج قطرة السائل أن النواة كروية (الفصل الثاني) ، وإذا ثبتنا N و Z وحسبنا طاقة الوضع لقطرة السائل النووية بدلالة التشوه في النواة من الشكل الكروي إلى الشكل المتطاول (Prolate) ، حصلنا على المنحنى الموضح في الشكل (10–8 أ) . توجد النواة في مستوى الطاقة الأرضي لبئر الوضع (Potential Well) . ولشطر النواة لأبُد أن تثار أو تهيج فوق حاجز الانشطار ، علماً بأنه يرتفع بمقدار 5–6 MeV . وهذا يعني أن تثار النواة إلى منطقة المستوى المستمر وعلى أن تحفظ بشكلها الأصلي . وفي حال حدث تشوه للنواة فإن بعض طاقة التهيج يتحول إلى طاقة تشوه . ويلاحظ من الشكل (10–8 أ) وصول النواة إلى أقصى كمية تشوه عند قمة الحاجز وبحيث تحتفظ بطاقة تهيج داخلي قليلة نسبياً . أي أن النواة موجودة في مستويات اهتزازية معروفة يحدث منها الانشطار ، وتسمى قمة الحاجز بنقطة السرج (Saddle Point) للانشطار .



شكل 10–8 : أ) منحنى طاقة الوضع حسب نموذج قطرة السائل .

ب) بعد إضافة التعديلات من نموذج مستويات الطاقة إلى المنحنى (أ) .

وجد العلماء أن معادلة الكتلة شبه التجريبية (الفصل الثاني) عاجزة عن حساب

الكتل بدقة للنظائر الموجودة بالقرب من الأرقام السحرية للبروتونات والنيوترونات . ولقد تبين مؤخراً عجز هذه المعادلة عن حساب الكتل بدقة للنظائر المشوهة والتي تقع في المنتصف بين الأرقام السحرية أو بين مستويات الطاقة الممتلئة للنيوكليونز . وأضاف ظهور بعض الأيزومرز التي تتحلل بالانشطار التلقائي مشاكل أخرى لنموذج قطرة السائل . فبين اليورانيوم والكاليفورنيوم العديد من النوى التي تتحلل بالانشطار التلقائي وبنصف عمر يتراوح من 10^{-12}–10^{-9} ثانية وهذا أبطء بملايين المرات من الانشطار الفوري الذي يحدث في 10^{-14} ثانية وأسرع بملايين المرات من الانشطار التلقائي العادي (الشكل 9–8) . ومن الأمثلة على ذلك ^{242}Cm الذي ينشطر تلقائياً من الحالة الأرضية بنصف عمر يساوي 10^{6} سنة، بينما تنشطر الحالة الأيزومرية له بنصف عمر يساوي 10^{-7} ثانية . ولقد طور العالم ق.م. ستروتينسكي نموذجاً يفسر بطريقة مرضية انشطار الأيزومرز . ويقدر حاجز الانشطار للنوى ذات نصف العمر القصير بحوالي 2–3 MeV . ولقد أدخل بعض التعديلات الناجمة عن تأثير مستويات الطاقة الممتلئة وغير الممتلئة في نموذج قطرة السائل وحصل على ما يسمى بمنحنى طاقة الوضع ذو البئرين (Double-Well) (الشكل 10–8 ب) . فيكون للنواة في البئر الأول الشكل شبه الكروي (Spheroid) وتكون نسبة المحور الرئيسي إلى الثانوي 1.25، ويزداد التشوه في البئر الثاني لتصبح النسبة 1.8 . وتكون النواة في البئر الثاني شبه مستقرة (حالة أيزومرية) وذلك لأنها غير مستقرة نحو التحلل بجاما إلى البئر الأول أو نحو الانشطار . ويعيق الانشطار من البئر الثاني حاجز ارتفاعه 2–3 MeV ومن البئر الأول حاجز ارتفاعه 5–6 MeV وهذا يفسر الفرق الكبير في نصف العمر كما ورد في مثال ^{242}Cm السابق . ويتنبأ منحنى البئر الواحد (شكل 10–8 أ) بحدوث انشطار متماثل بينما يتنبأ منحنى البئرين بالانشطار غير المتماثل (شكل 10–8 ب).

8-6 تهدئة النيوترونات Neutron Moderation

يُعتبر الأسلوب المتبع في تهدئة النيوترونات من سمات التصميم المهمة للمفاعلات الحرارية . وتفقد نيوترونات الانشطار السريعة طاقتها الحركية من خلال التشتت المرن مع ذرات مادة البناء . ولقد ذكرنا في الفصل الخامس معادلات التغير في طاقة النيوترون في هذه التصادمات المباشرة ، وبما أن هناك تشتت زاوي في معظم التصادمات فإن عدد التصادمات اللازمة لتقلل طاقة النيوترون السريع إلى نيوترون حراري أكبر . ويساوي معدل نقصان الطاقة اللوغارتمي ما يلي :

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{E_n}{E'_n}\right) \qquad (8-11)$$

حيث أن E'_n طاقة النيوترون بعد الاصطدام . ويبين الجدول (2–8) فعالية الماء H_2O العالية في تخفيض سرعة النيوترون بالمقارنة مع بعض المواد الأخرى كالماء الثقيل (D_2O) والبريليوم (Be) والجرافيت (C) . وإن معدل عدد الاصطدامات n اللازم لتقليل الطاقة للنيوترون من E^0_n إلى E_n هو :

$$n = \frac{1}{\varepsilon}\ln\left(E^0_n \big/ E_n\right) \qquad (8-12)$$

وتعتمد قدرة المادة على الإبطاء Slowing Down Power (SDP) على عدد التصادمات وعلى المقطع العرضي للتشتت (σ_s) وعلى عدد ذرات المادة المشتتة في وحدة الحجم (N_0) .

$$SDP = \varepsilon N_0 \sigma_s = \varepsilon \hat{\sum} s \qquad (8-13)$$

وتمثل قيمة SDP المعدل الذي يغطي منطقة النيوترونات الفوق حرارية . وتمتاز المادة المهدئة الجيدة بقدرتها على تحويل أقل عدد من النيوترونات بعيداً عن تفاعل الانشطار ، أي أن المقطع العرضي لامتصاص النيوترونات صغير . ولهذا فإن

للماء الثقيل D_2O وللجرافيت (الكربون) أفضلية على الماء الخفيف H_2O ، وذلك لأن احتمالية حدوث التفاعل $^1H(n,\gamma)^2H$ كبيرة نسبياً . ولإدخال هذه الخاصية ، يستخدم مفهوم نسبة التهدئة Moderating Ratio (MR) كمقياس لقدرة الماء المهدئة في منطقة طاقة النيوترونات الحرارية .

$$MR = \frac{SDP}{\hat{\sum}_a} = \varepsilon \frac{\hat{\sum}_s}{\hat{\sum}_a} \qquad (8-14)$$

Property الخاصية	H_2O	D_2O	Be	C
$N_0 \times 10^{-30}$ (atoms m^{-3})	0.033 4	0.033 4	0.123	0.080 3
ρ(t m^{-3})	1.0	1.10	1.84	1.62
σ_a (th) (barns)	0.66	0.000 92	0.009	0.004 5
$\sum_a$ (th) (m^{-1})	1.7	0.008 0	0.13	0.036
σ_s (epith) (barns)	49	10.6	5.9	4.7
ξ	0.927	0.510	0.209	0.158
$\xi \times$(epith) $\sum_s$ (th)$\sum_a^{-1}$	62	5860	138	166
L_m^2 (m^2)	7.62×10^{-4}	2.89	4.8×10^{-2}	0.287
τ (m^2)	0.002 8	0.011 5	0.010 0	0.038 0

جدول 2–8 : الخواص الفيزيائية لبعض المواد المهدئة .

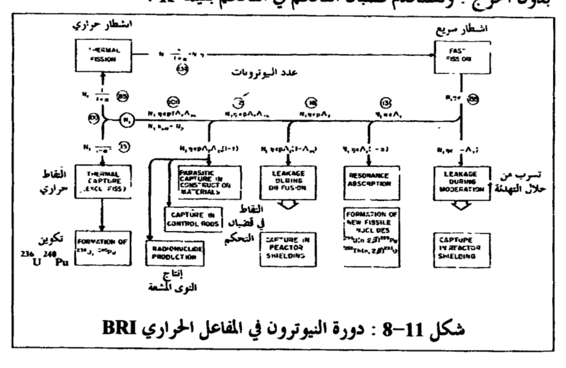
ويلخص الجدول (2–8) خـواص المـواد المهدئـة المعروفـة ، وتتنـاقص سمـات المواد المهدئة في الاتجاه التالي $H_2O < Be < C < D_2O$. وتستخدم المفاعلات التجارية الماء الخفيف H_2O بدلاً من الماء الثقيل D_2O لرخص ثمنه وتوفره بكميات كبيرة في الأنهار والبحيرات .

8-7 دورة النيوترون The Neutron Cycle

من أجل استمرار التفاعل المتسلسل لابد مـن أن يتسـبب أحـد النيوترونـات الناتجة عـن الانشـطار في انشـطار جديـد . وتعـرف هـذه الحالــة بمعــامل التكــاثر للنيوترونات K والذي يساوي :

$$K = \frac{\text{عدد النيوترونات في الجيل 2}}{\text{عدد النيوترونات في الجيل 1}} \qquad (8-15)$$

فإذا كانت قيمة K > 1 فإن عدد النيوترونات في الجيل الثاني أعلى من عدد النيوترونـات المسـتهلكة . وفي هــذه الحالــة يـزداد فيـض النيوترونــات وعــدد الانشطارات في كل جيل جديد مما سيؤدي إلى زيادة في إنتـاج الطاقـة في المفـاعل . وفي حال كانت قيمة K = 1 فإن عدد الانشطارات في وحدة الزمن والطاقة الناتجة ثابتين . وأما إذا كانت K < 1 فلن يسـتمر التفـاعل المتسلسـل . ويسـمى المفـاعل الذي يعمل ضمن K = 1 بالحرج ، وضمن K > 1 بفوق الحـرج وضمـن K < 1 بدون الحرج . وتستخدم قضبان التحكم في التحكم بقيمة K .



شكل 11-8 : دورة النيوترون في المفاعل الحراري BRI

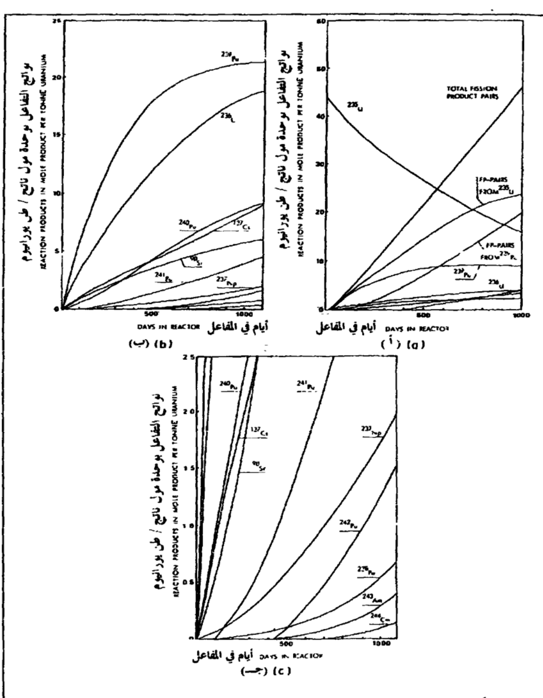
تتعرض النيوترونات في كل جيل للعديد من المصائر الشكل (8−11) . فبعضها يهرب من المفاعل أو يمتص من قبل المواد المكونة للمفاعل والدرع الواقي (مثل قضبان التحكم ، والمواد المهدئة والمبردة ... إلخ) . ويستخدم في واقع الأمر معاملان مختلفان لتكاثر النيوترونات هما K_∞ للمفاعل ذو الأبعاد اللانهائية (لا يوجد تسرب) و K_{eff} للمفاعل ذو الحجم المحدد العملي ، ويرتبطان مع بعضهم البعض من خلال المعادلة التالية :

$$K_{eff} = K_\infty \wedge \qquad (8-16)$$

ويمثل $\wedge$ ذلك الجزء من النيوترونات الذي لا يفقد نتيجة تسربه إلى المناطق المحيطة (معامل عدم التسرب) . ومن أجل أن نقلل من تسرب النيوترونات ، يُحاط لب المفاعل بعاكس للنيوترونات **Neutron Reflector** ، مكون من الجرافيت أو الماء أو البريليوم في حال النيوترونات الحرارية أو الحديد في حال النيوترونات السريعة.

8-8 الإفادة من الوقود Fuel Utilization

يوضح الشكل (8−12) استهلاك ^{235}U المنشطر وتكون ^{239}Pu و ^{241}Pu القابلة للانشطار وبعض الأكتينيدات وبعض نواتج الانشطار من خلال التقاط النيوترونات المصحوب بالإشعاعات من قبل ذرات ^{238}U و ^{240}Pu الخصبة . ولكل نوع من المفاعلات شكل خاص فيه ومنحنيات خاصة به . ويبين الشكل (8−4) تفاعلات الالتقاط والتحلل المختلفة . ومن (8−2) يستهلك المفاعل الذي يعمل بطاقة 3 غيغاواط حراري 3.16 كغم ^{235}U في اليوم ، ونظراً للتفاعل التالي $^{235}U(n,\gamma)\ ^{236}U$ فسوف تستهلك كمية إضافية من اليورانيوم−235 ، ولتبرير كل هذا تستخدم العلاقة التالية : $\frac{\sigma_f + \sigma_\gamma}{\sigma_f} = 1.17$.

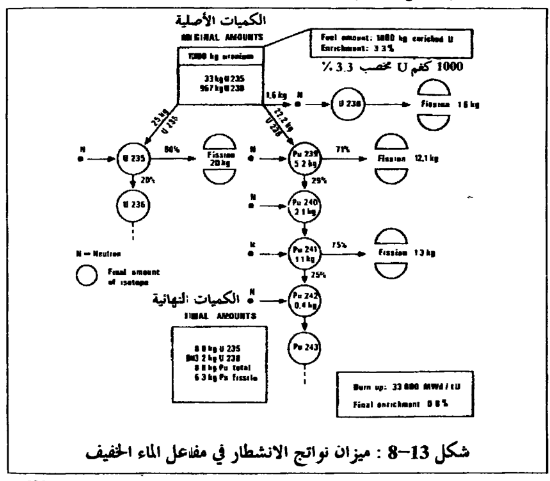


شكل 12–8 : علاقة نواتج التفاعل بوحدة مول ناتج/طن يورانيوم في

أ) يورانيوم مخصب بنسبة 1٪ ^{235}U في مفاعل الجرافيت . (230 ميغاواط حراري)

ب) و(جـ) يورانيوم مخصب بنسبة 3.3٪ في مفاعل الماء الخفيف (1000 ميغاواط طاقة)

أي أن استهلاك ^{235}U الفعلي = 3.16×1.17 = 3.70 كغم/اليوم . وهذا ينطبق على لب المفاعل الجديد فقط ، لأن المفاعل الذي يعمل لفترة من الزمن سينتج ^{239}Pu والذي سينشطر ويطلق طاقة تضاف إلى الطاقة المنطلقة من ^{235}U . وبعد ذلك سيساهم ^{241}Pu أيضاً . وبعبارة أخرى يقل استهلاك ^{235}U تدريجياً مع مرور الزمن لنفس الكمية من الطاقة المنتجة . ففي فترة عمر اللب المخصب باليورانيوم بنسبة 2–3٪ يتسبب انشطار نظائر البلوتونيوم في 40٪ من الطاقة الكلية الناتجة (الشكل 13–8) .



شكل 13–8 : ميزان نواتج الانشطار في مفاعل الماء الخفيف

وتستهلك محطة الطاقة التي تعمل بالماء الخفيف LWR 2.2 كغم ^{235}U و 2.0 كغم ^{238}U في اليوم وتنتج 1000 ميغاواط طاقة بفاعلية 33٪ . وفي المقابل ينتج

3.1 كغم من نواتج الانشطار في اليوم من انشطار اليورانيوم والبلوتونيوم . ولهذا تستخدم المقاطع المستعرضة الفعالة في حساب الناتج (الشكل 4-8) . وكلما ازداد ^{239}Pu و ^{241}Pu الناتج مقابل كل ذرة ^{235}U تستهلك ازدادت فعالية الإفادة من الوقود . ونعبر عن هذا بمعامل التحويل C .

$$C = \eta - 1 - S \qquad (8-17)$$

وتمثل S النيوترونات المفقودة أو الضائعة بطرق أخرى غير الانشطار وتفاعلات الالتقاط التي تؤدي لإنتاج ذرات قابلة للانشطار . فإذا افترضنا أن C=0.8 لمفاعل ماء ثقيل فإن مقابل كل 100 ذرة منشطرة من ^{235}U سينتج 80 ذرة جديدة من ^{239}Pu و ^{241}Pu .

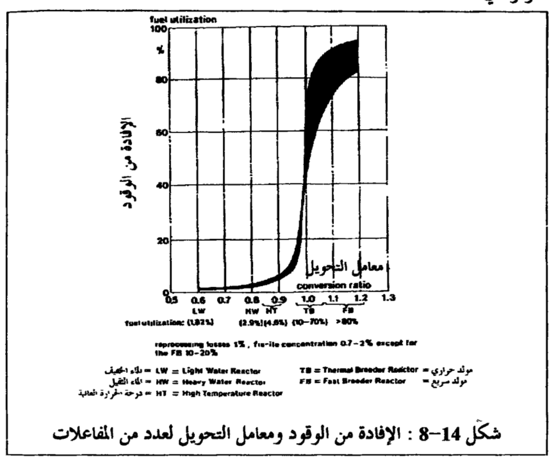
وفي الجيل الثاني ينتج C^2 جديدة من ذرات ^{239}Pu و ^{241}Pu . أي أن الجزء الذي يتحول من الوقود إلى ذرات قابلة للانشطار هو :

$$x_i (1 + C + C^2 + ...) = \frac{x_i}{1 - C} \qquad (8-18)$$

وتمثل x_i ذلك الجزء من الذرات القابلة للانشطار في العينة الأصلية ، وتساوي لليورانيوم الطبيعي 0.0071 ، وتمثل النسبة $\frac{x_i}{1-C}$ الإفادة القصوى للوقود . وإذا استطاع مفاعل ما أن يستهلك كل المواد القابلة للانشطار الأصلية والمصنعة فيه ، حصلنا على خمس أضعاف الطاقة المنتجة من تركيز ^{235}U الأصلي فقط عند $C = 0.8$. ويستحال حدوث هذا نظراً لكبر المقطع المستعرض لالتقاط النيوترون من قبل نواتج الانشطار .

وتسمى المفاعلات التي لها $C \approx 1$ بالمفاعلات المحولة Converter Reactors، والمفاعلات التي لها $C < 1$ بالمفاعلات الحراقة Burners . وتصنف مفاعلات الماء الخفيف ضمن الحراقة لأن لها $C \leq 0.6$. ويوضح الشكل (14-8) الإفادة من


الوقود في المفاعلات المختلفة .



شكل 14–8 : الإفادة من الوقود ومعامل التحويل لعدد من المفاعلات

ويشار إلى الإفادة من الوقود بالاستحراق Burn-up ونعبر عنه بنسبة الوقود المستعمل قبل أن يستبدل . فعلى سبيل المثال إذا كان الحرق 1٪ فهذا يعني أن من كل 1.0 طن من الوقود ، يستهلك 10 كغم من الذرات المنشطرة والذرات التي تتكون ولديها قابليها للانشطار من خلال الانشطار والالتقاط . ولقد جرت العادة أن نعبر عن الاستحراق بكمية الطاقة الناتجة من كل طن من الوقود . فإنتاج 33000 ميغاواط/اليوم من الطاقة الحرارية يستهلك 25 كغم ^{235}U و 23.8 كغم ^{238}U من كل 1000 كغم يورانيوم مخصب ، أي ما نسبته 4.88٪ ، في مفاعل الماء الخفيف LWR . وأما ما نسبته 1٪ استحراق فيساوي $= \frac{33000}{4.88} = 6762$

ميغاواط حراري يومياً/طن من اليوارنيوم . وإذا أخذنا بعين الاعتبار 6.3 كغم من البلوتونيوم المتكون والذي يحل محل ^{235}U فسيقل الاستهلاك الكلي إلى 48.8−6.3 = 42.5 كغم أو 4.25٪ ، أي أن 1٪ استحراق يساوي 7765 ميغاواط حراري/يوم طن يورانيوم . ويعطي كل 7 طن يورانيوم طبيعي واحد طن من اليورانيوم المخصب بنسبة 3.3٪ ^{235}U ، أي أن الإفادة من اليورانيوم الطبيعي قليلة، على أن إعادة تصنيع البلوتونيوم الناتج ستزيد من الإفادة إلى الأرقام الموجودة في الشكل (8−14) .

وفي حال كانت قيمة $C > 1$ نتج عن المفاعل مواد قابلة للانشطار أكثر من المستهلكة في الانشطار ، وسمي هذا النوع من المفاعلات بالمولد وسميت العملية بالتوليد . ويعبر عن كسب التوليد (Breeding Gain) G بالمعادلة التالية :

$$G = \eta - 2 - S \qquad (8-19)$$

ويعرف كسب التوليد بقدرة المفاعل على التوليد ، ويلاحظ من الجدول (8−1) أن قيمة $\eta > 2$ لكل من ^{233}U و ^{235}U و ^{239}Pu و ^{241}Pu ، وقد تزداد قيمة η إذا استخدمت المقاطع المستعرضة الفعالة (الشكل 8−4) فإذا وجدت هذه الأنوية مع المواد التي يمكن أن ينتج عنها مواد انشطارية مثل ^{238}U و ^{232}Th نتجت مواد انشطارية أكثر من تلك المستهلكة على شرط أن تكون خسارة النيوترونات أقل ما يمكن . وتزداد الإفادة في المولدات إلى 10٪ كحد أقصى في وجود المحولات، ويسمح التوليد باستخدام حوالي 70٪ من مادة الوقود (اليورانيوم الطبيعي أو الثوريوم الطبيعي) مع الاستفادة من إعادة التصنيع (الشكل 8−14) .

ويبين الجدول (8−1) أن أعلى قيمة η هي لـ ^{233}U مع النيوترونات الحرارية ولـ ^{239}Pu مع النيوترونات السريعة . وهذا يوحي بوجود نوعين من المولدات ،

المولدات الحرارية المبنية على التفاعل $^{232}Th \rightarrow {}^{239}Pu$ والمولـدات السـريعة المبنية على التفاعل $^{238}U \rightarrow {}^{239}Pu$.

ومن أجل أن تعمل هذه المولدات بفاعلية عالية لأبُد من تزويدها بتركيز عال من ^{233}U أو ^{239}Pu يتراوح من 15٪ إلى 30٪ .

وتصل الإفادة من الوقود في المولد السريع مثل فينكس الفرنسي إلى أعلى مـا هو مذكـور في مفـاعلات المـاء الخفيـف ، فواحـد في المئـة استحراق يكـافئ 8500 ميغاواط حراري/يوم طـن مـن الـذرات الثقيلـة . وقـد يصـل الاسـتحراق إلى 15٪ (130000 ميغاواط/يوم طن) .

8-9 ظاهرة أوكلو The Oklo Phenomenon

استخرج الفرنسيون اليورانيوم من منجم أوكلو في الغابون في أفريقيا للعديـد مـن السـنين ، وكـانوا ينقلـون اليورانيـوم إلى محطـة بـيرلات لتخصيـب اليورانيـــوم الفرنسـية لاسـتخدامه في المفـاعلات . وقــدر الخــام بحـولاي 400000 طــن مــن اليورانيوم ولقد وجدت بعض الجيـوب الغنيـة جـداً بـاليورانيوم مطمـورة في الحجـر الرملي والغرانيت . وتأخذ هذه الجيوب شكل العدسـة ويبلـغ طولهـا 10م وقطرهـا حوالي 1م وتحتوي على 10–20٪ بتش بلند ، وهناك بعض البقع الـتي تحتـوي علـى 85٪ من البتش بلند النقي .

وفي عام 1972 اكتشف العلماء أن نسـبة نظـائر اليورانيـوم لبعضهـا البعـض تختلف عن النسبة المعروفة لليورانيوم والمستخرجة من مصادر أخرى ، فلقـد بلغـت نسبة ^{235}U في خام الغابون أقل من < 0.5٪ علماً بأن النسـبة في اليورانيوم الطبيعـي 0.72٪ ، وتؤدي النسبة القليلة < 0.5٪ إلى صعوبات في عملية التخصيب . ولقــد

أظهرت الدراسات أن نسبة ^{142}Nd في النيوديميوم الطبيعي 27٪ بينما في أوكلو أقل من 5٪ ، ونسبة ^{143}Nd 12٪ بينما في أوكلو 24٪ . وإذا درسنا نواتج الانشطار وجدنا أن نسبة ^{143}Nd 29٪ ونسبة ^{142}Nd صفر بالمقارنة مع النسب في أوكلو لـ ^{142}Nd , ^{143}Nd , ^{235}U . وفسر العلماء هذا على أساس انشطار ^{235}U في الزمن الماضي ، مما أدى إلى انخفاض نسبة ^{235}U وزيادة نسبة ^{143}Nd ، ولقد دعمت هذا التفسير الدراسات التي أجريت على التكوين النظيري لعناصر الانشطار الأخرى .

ونظراً لقصر نصف عمر ^{235}U بالمقارنة مع ^{238}U فإن كل خامات اليورانيوم كانت غنية باليورانيوم 235 في الزمن الماضي . ولقد قدر العلماء عمر الرواسب في أوكلو بـ 1.74×10^{9} سنة من خلال تحليل ^{87}Sr - ^{87}Rb وأن نسبة ^{235}U في ذلك الوقت في اليورانيوم الطبيعي بـ 3٪ .

ويزداد عامل الانشطار η كلما ازدادت نسبة ^{235}U ، ويساوي 1.8 عند 3٪ ^{235}U ، ولقد أدت الظروف في رواسب أوكلو الطبيعية إلى قيمة $K_{\infty} > 1$. وبما أن طبيعة الرواسب رسوبية ، وأنها قد تكونت في وجود الماء وكانت نسبة $U : H_2O$ هي 1:3 فإن $K_{\infty} > 1$.

ولقد أثبتت التحاليل والحسابات وجود مفاعلات أوكلو الطبيعية لمدة تقل عن $\geq 10^{6}$ سنة . وكان للماء دور مهم فكلما غلي الماء وتبخر توقف عمل المفاعل إلى أن يأتي المطر بالماء فيعود المفاعل إلى العمل . وقدر فيض النيوترونات بما لا يقل عن 10^{9} n/سم^{2} ثانية . كما قدرت كمية ^{235}U المستهلكة بحوالي 6 طن ، والطاقة الناتجة الكلية بحوالي 2–3 غيغا واط/السنة وكمية ^{239}Pu المتكونة من التقاط ^{238}U لنيوترون بحوالي 1.0–1.5 طن ، ونظراً لقصر عمر ^{239}Pu النسبي فلقد تحلل مع مرور السنين إلى ^{235}U . ويستدل على هذا من وجود بعض العينات المخصبة

باليورانيوم–235 .

ولقد بينت الدراسـات وجـود الفضـلات المشـعة في مفـاعل أوكلـو ، فهنـاك البلوتونيوم والعناصر النادرة ، أما العناصر المتطايرة والذائبة في الماء مثـل السـيزيوم والسترونشيوم فلم توجد في موقع المفاعل ، ووجـدت نواتـج الانشـطار الأخـرى ، على الرغم من مرور 1.7×10^{9} سنة . وهناك عدة أمثلة في العالم على مـا حـدث في أوكلو .

8-10 الوقود النووي Nuclear Fuels

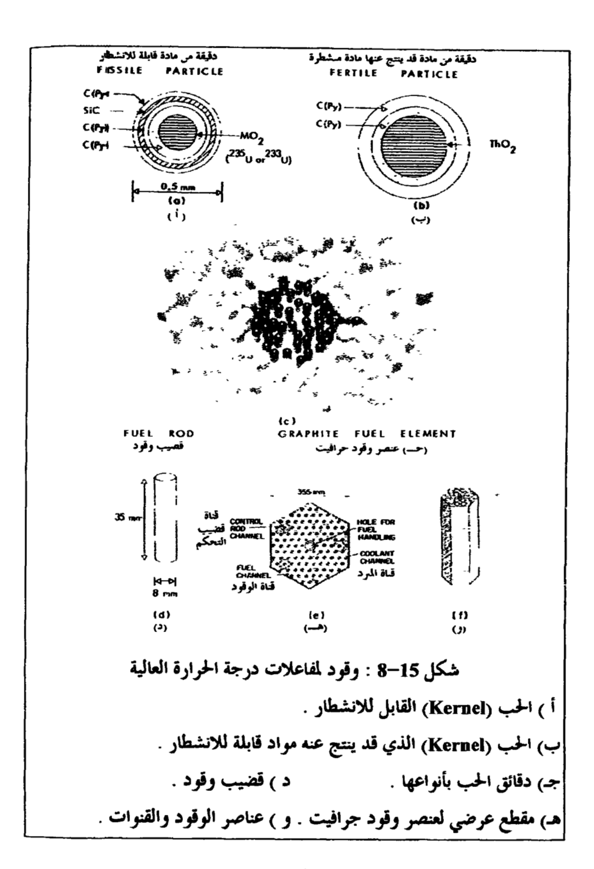
تستخدم المفاعلات النووية التجارية اليورانيوم كوقـود . ويكـون اليورانيـوم إما بحالته الطبيعيـة (نسـبة ^{235}U 0.7٪) أو مخصـب بـاليورانيوم–235 لـترتفع نسـبة ^{235}U . وقد تحتوي بعض المفاعلات أيضاً على ^{232}Th الذي يولد ^{233}U المنشـطر أو ^{239}Pu الناتج عن ^{238}U بالإضافة إلى ^{235}U (وقود متنوع) .

وبغض النظر عن عنصر الوقود أكان يورانيوم أو ثوريوم أو بلوتونيـوم فلابـد أن تكون لديه القدرة على مقاومة درجـات الحـرارة المرتفعـة والـتي قـد تزيـد علـى 1000°م دون أن يفسـد كيميائياً أو فيزيائياً بسبب الحرارة أو الإشعاع .

تتمتع عناصر الوقود المعدنيـة بـالتوصيل الحـراري العـالي ممـا يسـاعدها علـى تقليل آثار الحرارة ولكن لسوء الحظ ينصهر اليورانيـوم عنـد 1130°م والبلوتونيـوم عند 640°م . وقد تتسبب الحرارة أو الإشعاع مجتمعين أو منفصلين إلى إعادة التبلور لتعطي أشكالاً بلورية مختلفة ذات أبعاد فيزيائيـة مختلفـة في قضبـان الوقـود . وتقلـل هذه التشوهات من الاستقرار الميكانيكي وتزيد من التآكل لعنصر الوقـود حتـى لـو كانت مكسوة بالمعدن .

تستخدم معظم مفاعلات الطاقة حبيبات من UO_2 أو PuO_2 أو ThO_2 المغلفة بالسيراميك ، ويصل حجم الحبيبات الاسطوانية إلى 1×1 سم (القطر X الارتفاع) الشكل (15–8 أ) . وتمتاز عناصر الوقود السيراميكية بمقاومتها لدرجات الحرارة العالية وللإشعاعات ولا يحدث فيها تحولات في الحالة (أو الطور) كما في المعادن . ولسوء الحظ فإن توصيلها الحراري غير مرض بالمقارنة مع عناصر الوقود المعدنية ولهذا قد يصل الميل الحراري فيها إلى 100°م/ملم مما قد يؤدي إلى انصهار عناصر الوقود السيراميكية الموجودة في المركز (درجة انصهار UO_2 2700°م) بينما تبقى درجة الحرارة عند السطح أقل بكثير من درجة الانصهار . وللحصول على أقصى توصيل حراري في مواد الوقود السيراميكية لابُد من ضغطها بشدة وتلبيدها لتصل إلى كثافة 11 غم/سم^3 UO_2 . وإذا استخدم مخلوط من الأكاسيد كعناصر للوقود (MOX) كاستخدام UO_2 مع < 5٪ PuO_2 في مفاعلات الماء الخفيف أو UO_2 مع ≥ 15٪ PuO_2 في المولدات السريعة ، يجب أن يكون مخلوط UO_2–PuO_2 متآلف لحد كبير ، كأن يكون محلول صلب . ويتم الحصول عليه من خلال عملية الترسيب الإسهامي للأكتينيدات رباعية التأكسد على هيئة الأوكزالات المتبوعة بعملية الكلسنة . تضاف عناصر الوقود MOX بشكل منتظم إلى لب العديد من مفاعلات الماء الخفيف الأوروبية دون أي صعوبات تقنية . كما يستخدم مخلوط من أكسيد اليورانيوم والثوريوم كوقود في مفاعلات الماء الثقيل .

ويمكن الاستعاضة عن الحبيبات بدقائق الوقود الكروية ، نظراً للعديد من المزايا كالتصنيع والإفادة من المفاعل وإعادة تصنيع الوقود . ولدقائق الأكسيد أو الكربيد قطر صغير أقل من 1ملم (الشكل 15–8 جـ) .



شكل 15–8 : وقود لمفاعلات درجة الحرارة العالية

أ) الحب (Kernel) القابل للانشطار .

ب) الحب (Kernel) الذي قد ينتج عنه مواد قابلة للانشطار .

جـ) دقائق الحب بأنواعها .   د) قضيب وقود .

هـ) مقطع عرضي لعنصر وقود جرافيت . و) عناصر الوقود والقنوات .

وتصنع هذه الدقائق بطريقة الجل–المحلول (Sol-gel process) حسب الخطوات التالية :

أ) يحضر محلول غروي من الأكتينيدات أو الأكتنيد . وقد تأخذ الأكتنيدات صيغة المعقدات المميهة عند التراكيز العالية من 3–4 جـ (M) .

ب) يضاف المحلول إلى مذيب خامل ، والذي بدوره يزيل الماء من المعقد فيحول القطرات إلى مادة هلامية . ومن الأمثلة على ذلك إضافة سداسي مثلين رباعي الأمين $(CH_2)_6N_4$ إلى المحلول المائي ، ثم يضاف المحلول الناتج قطرة قطرة إلى المذيب العضوي الساخن (حوالي 95°م) . تؤدي الحرارة إلى تحلل $(CH_2)_6N_4$ ليعطي NH_3 والتي بدورها ترسب الهيدروكسيد في القطرة . تفقد القطرة الماء وتتصلب بسرعة مكونة ما يسمى بالحب "Kernel" .

جـ) يغسل الحب ويجفف بالهواء عند 150–200°م وفي حال اليورانيوم يختزل بالهيدروجين عند درجة حرارة عالية ليكون UO_2 .

د) يلبد الحب عند درجة حرارة عالية في جو خامل .

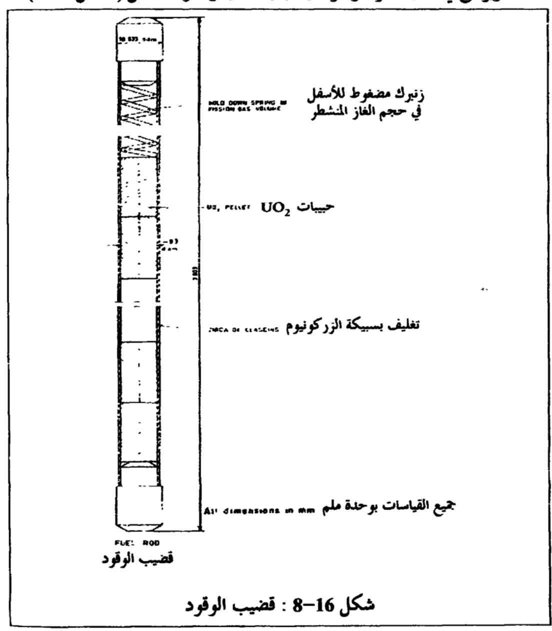
وتستخدم الطريقة السابقة في تحضير حب كربيدات الأكتنيد . ويوضع الحب في أغطية قضبان الوقود ثم يضغط ليكون حبيبات (الشكل 15–8 د) .

يغلف الوقود المعدني بصفائح من الألمنيوم أو المغنيسيوم أو بسبيكة منهما ، أما حبيبات أكسيد الوقود فتغلف بسبائك من الزركونيوم أو الفولاذ . وتهدف عملية تغليف الوقود إلى حمايته من التآكل وإلى حماية المبرد من التلوث الإشعاعي من نواتج الانشطار .

يستخدم الألمنيوم في مفاعلات الماء الخفيف ولكن عند درجة حرارة أعلى من 300°م لابُد من استخدام سبائك الزركونيوم الأقوى . ويمتص الزركونيوم الهيدروجين إذا وصلت درجة حرارة البخار إلى أعلى من 400°م ، مما يؤدي إلى الزيادة في هشاشته ، فيستعاض عنه بالفولاذ . ومن أشهر السبائك ، سبيكة الزركونيوم–2 والتي تتكون من 1.5٪ Sn و 0.3٪ Cr و Ni و Fe ، بالإضافة إلى الزركونيوم ، وسبيكة الفولاذ–302B والتي تتكون من 18٪ Cr و 8٪ Ni بالإضافة إلى الفولاذ . ولا يستخدم الفولاذ عند درجات الحرارة المنخفضة لارتفاع المقطع المستعرض لالتقاط النيوترونات ($\sigma = 0.23$ b للألمنيوم و 0.18 b لسبيكة الزركونيوم و 3b للفولاذ–302B) .

وللحصول على توصيل حراري جيد بين الوقـود والتصفيـح تستخدم مـواد رابطة مثل مصهـور الصوديـوم ومسـحوق الجرافيـت ... إلخ . ويجـب أن تتوفـر في مادة التغليف أو التصفيح القدرة على مقاومة التآكل من المبرد عنـد جميـع درجـات الحرارة وأن لا تتفاعل مع عنصر الوقود أو مع المادة الرابطة .

ويراعى في التغليف الرقة والقوة الميكانيكية الكافية والمقاومة للتآكل (الشكل 16–8) .



شكل 16–8 : قضيب الوقود

تتكون عناصر الوقود المستخدمة في المفاعلات المبردة بالغاز ذات درجات الحرارة العالية من قضبان من الجرافيت أو كرات مملوؤة بحبيبات الكربيد أو الأوكسيد المحضرة بطريقة الجل-المحلول . كما تغطى الحبيبات بعدة طبقات من الجرافيت وكربيد السليكون (الشكل 15-8 أ و ب) .

يشكل الوقود أهم جزء في اقتصاد مفاعلات الطاقة ، ويساهم بحوالي 20٪ من تكلفة الطاقة الكهربائية المولدة من المفاعلات من خلال استهلاك المادة المنتظرة والإنتاج وإعادة التصنيع . ويتطلع العلماء إلى التقليل من تكلفة الوقود في مفاعلات التوليد السريعة .

8-11 مفاهيم المفاعل Reactor Concepts

صممت المفاعلات النووية لإنتاج الطاقة الحرارية والميكانيكية والكهربائية ولإنتاج النوى المشعة والمواد المستخدمة في الأسلحة النووية ولإجراء الأبحاث في مجال الفيزياء والكيمياء النووية ... إلخ . ويتوقف تصميم المفاعل على استخداماته ففي حال المفاعلات المستخدمة لإنتاج الطاقة الكهربائية يتم اختيار التصميم الذي يعطي كهرباء بأرخص الأسعار آخذين بعين الاعتبار جودة التصميم لفترة زمنية طويلة . وقد يعدل التصميم بناءً على توفر واقتصاد المصادر الوطنية وعلى القوى البشرية والمهارات المتوفرة وعلى أسباب السلامة . كما تسعى الدول الراغبة في الحصول على الأسلحة النووية إلى اختيار نظام المفاعل الوطني الذي يؤمن لها ما تحتاجه من مواد انشطارية وتستطيع أن تضبط عملية تهريب أو انتقال هذه المواد إلى بلدان غير نووية أو منظمات إرهابية (حسب تعريف الدول الخمس النووية) . وفي وقتنا هذا هناك ما لا يقل عن 12 تصميم مستخدم في المفاعلات في العالم .

هناك ثلاث مبادئ رئيسية تدخل في تصميم المفاعل :

أ) طاقة النيوترونات (مفاعلات حرارية أو سريعة) .

ب) شكل لب المفاعل (متجانس أو غير متجانس بين الوقود والمبرد)

جـ) الإفادة من الوقود (حراق أو محول أو مولد) .

وقد يتكون اللب في المفاعل المتجانس من مصهور المعدن أو مصهور الملح أو محلول مائي أو محلول عضوي . وأما في المفاعل غير المتجانس فيتكون الوقود من قضبان مملوءة بأكسيد المعدن . وقد تتكون مادة الوقود من الذرات القابلة للانشطار ومن الذرات التي قد ينتج عنها ذرات أخرى قابلة للانشطار مخلوطة أو مفصولة كأن يكون اللب من الذرات القابلة للانشطار والبطانة من الذرات التي قد ينتج عنها ذرات أخرى قابلة للانشطار . ومن المهدئات المستخدمة : H_2O أو D_2O أو Be أو الجرافيت أو مذيب عضوي . ومن المبردات المستخدمة : مصهور المعدن أو مصهور الملح أو الماء H_2O السائل أو الماء الثقيل D_2O أو المذيب العضوي أو غاز CO_2 أو غاز الهيليوم أو بخار الماء . ويلخص الجدول (3–8) أنواع المفاعلات المختلفة المعروفة والجدول (4–8) الخصائص المهمة لبعض المفاعلات المستخدمة .

AGR	**Advanced gas-cooled graphite-moderated reactor**
BHWR	**Boiling heavy-water-cooled and -moderated reactor**
BWR	**Boiling light-water cooled and -moderated reactor**
FBR	**Fast breeder reactor**
GCFBR	**Gas-cooled fast breeder reactor**
GCR	**Gas-cooled graphite-moderated reactor**
HTGR	**Hight temperature gas-cooled graphite-moderated reactor**
HWGCR	**Heavy-water-moderated gas-cooled reactor**
HWLWR	**Heavy-water-moderated light-water cooled reactor**
LWGR	**Light-water-cooled graphite-moderated reactor**
LMFBR	**Liquid-metal-cooled fast breeder reactor**
OMR	**Organic-moderated and -cooled reactor**
PHWR	**Pressurized heavy-water-moderated and -cooled reactor**
PWR	**Pressurized light-water-moderated and -cooled reactor**
SGR	**Sodium-cooled graphite-moderated reactor**

جدول 3–8 : أنواع المفاعلات المختلفة باللغة الإنجليزية والاختصار لكل منهم .

8-12 الفضلات المشعة Radioactive Wastes

تتجمع نواتج الانشطار والأكتنيدات في المفاعلات النووية المثالية في داخل عناصر الوقود ، وهناك ثلاث طرق يمكن من خلالها للمواد المشعة بأن تغادر وعاء المفاعل ومحمولة من قبل المبرد في جميع الحالات :

أ) النشاط الإشعاعي المتولد في وسط التبريد .

ب) تحتوي نواتج التآكل النشاط الإشعاعي المتولد من مواد البناء .

جـ) تسرب نواتج الانشطار والأكتنيدات من عناصر الوقود التي بها عيوب.

وبناء على هذا فإن مفاعل HTGR أقرب إلى المفاعل المثالي ، بينما تشكل نواتج النشاط الإشعاعي في مفاعلي BWR و PWR مصدر قلق كبير . وتقسم الفضلات المشعة إلى فضلات غازية وسائلة وصلبة .

8-12-1 الفضلات الغازية Gaseous Wastes

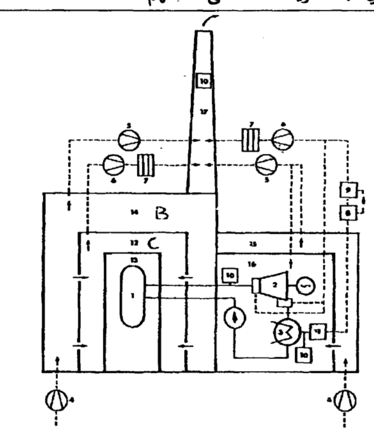
يتسبب فيض النيوترونات السريعة والحرارية العالي في إنتاج عدة أنشطة إشعاعية في الماء الخفيف H_2O هي :

$^{2}H(n,\gamma)^{3}H$ و $^{16}O(n,p)^{16}N$ و $^{18}O(n,\gamma)^{19}O$ و $^{18}O(n,p)^{18}F$. وينتج ^{13}N المشع من تفاعلي $^{13}C(n,p)^{13}N$ و $^{14}N(n,2n)^{13}N$ ،ويأتي الكربون من الفولاذ وCO_2 والنيتروجين من الماء . وينتج ^{14}C من تفاعلات ^{13}C و ^{14}N (الذائب في الوقود بتركيز 10–60 ppm) و ^{16}O ، وتقدر الكمية الناتجة بحوالي 10–20 كوري ^{14}C لكل غيغا واط كهرباء/سنة . ونتيجة لوجود B و Li و Ar في ماء التبريد تحدث التفاعلات التالية $^{10}B(n,2\alpha)^{3}H$ و $^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$ و $^{40}Ar(n,\gamma)^{41}Ar$. وتتراوح كمية التريتيوم في مفاعل PWR من 1–10 كوري/م^3 وذلك لاحتوائه على حامض البوريك ، وفي مفاعل BWR تصل إلى 10^{-3} كوري/م^3 .

النوع Type	المثال والبلد Example	الطاقة Power (M We)	الوقود Fuel (enrichm.%)	التغليف Cladding	المهدئ rator	المبرد Coolant	درجة حرارة المبرد Coolant temp. (°C)	ضغط المبرد Coolant press. (M Pa)	صافي الفعالية Net eff. (%)	الاستحراق Burn-up (M Wdt^{-1})	معامل درجة الحرارة Temp. coeff.	حجم اللب Core size (h×d m^2)
PWR	Diablo Canyon, USA	1100	88 t UO_2 (2.5)	Za	H_2O	H_2O	317	16	32	33 000	-Neg.	3.7×3.4
PWR	Novovoronezh, USSR	1000	75 t UO_2 (~4)	Za	H_2O	H_2O	322	16	32	26 500	-Neg.	3.5×3.1
BWR	Forsmark, Sweden [a]	900	140 t UO_2 (2.6)	Za	H_2O	H_2O	290	7	34	30 000	-Neg.	3.6×4.5
PHWR	Bruce 1, Canada	746	129 t UO_2 (nat.)	Za	D_2O	D_2O	304	8.7	30	9 800	+Pos.	5.9×7.1
GCR	Wylfa, UK	655	595 t U (~2)	Mgn	C	CO_2	414	2.8	26	3 500	+Pos.	9.2×17.4
AGR	Hinkley Point B, UK	620	129 t UO_2 (~2)	St	C	CO_2	645	4	42	18 000	+pos.	8.3×9.1
HTGR	Fort St Vrain, USA	330	1 t UC (93), 20 t ThC	C	C	He	770	5	39	100 000	-Neg.	5.9×4.8
LMFBR	Phenix, F	233	0.8 PuO_2, 4 t UO_2 (0.3)	St	-	Na	510	0.1	41	70 000	-Neg.	0.9×1.4

جدول 4-8 : خواص بعض مفاعلات الطاقة المستخدمة في العالم .

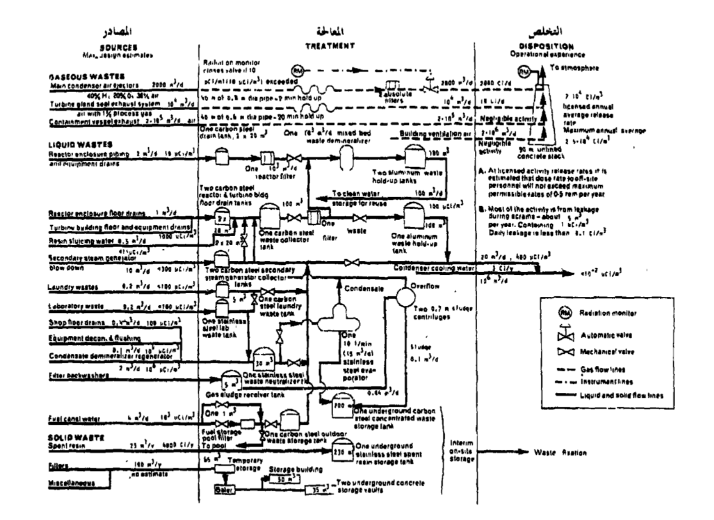
ويلاحظ أن هذه الأنوية المشعة الناتجة نصف عمر قليل ، أي أنها تتحلل إلى نواتج مستقرة من خلال أشعة جاما ذات الطاقة العالية . تنتقل الغازات المشعة في مفاعلات BWR مع البخار إلى التوربينات ، حيث يتحلل جزء منها هناك مما يؤدي إلى زيادة في النشاط الإشعاعي في هذا الجزء من المفاعل ولا يسمح للأشخاص العاملين هناك في البقاء طويلاً حفاظاً على سلامتهم .



شكل 17–8 : نظام تنقية الغاز والتهوية في مفاعل BWR

1) مفاعل 2) التوربين 3) مكثف التوربين 4) مراوح التهوية 5) مراوح إخراج الهواء النقي 6) مراوح إخراج الهواء الملوث 7) مصافي متعددة 8) خزانات تأخير 9) فاصل للغازات النبيلة 10) جهاز لقياس النشاط الإشعاعي 11) طارد فراغي 12) فراغ في مبنى المفاعل C 13) وعاء المفاعل 14) فراغ في مبنى المفاعل B 15) فراغ B في مبنى التوربين 16) حاوي التوربين 17) مجموعة .

ولتقليل التلوث الناجم عن النواتج الغازية المنقولة مع البخار لابُد من توفر نظام تصريف وشفط فاعلين في موقع المكثف في التوربين . وبهذا يزال النشاط الإشعاعي قبل أن تتم عملية الإمساك بالغازات من قبل المصافي المكونة من عدة طبقات من مادة ماصة كالفحم . ويحتوي نظام التهوية على مصافي وظيفتها التقاط أي نشاط إشعاعي يتسرب خارج المفاعل والتوربين لأن لا يتسرب إلى البيئة المحيطة مع الهواء الخارج . ويبين الشكل (17–8) نظام تنقية الغاز الموجود في مفاعل BWR . وإذا انطلقت نواتج الانشطار من عناصر الوقود التي بها عيوب (المعيوبة)، فإن أول ما يظهر في ماء التبريد ^{133}Xe و ^{135}Xe و ^{85}Kr و ^{133}I ... إلخ. وتحتفظ مصافي الفحم بالغازات النبيلة ويزال اليود بعدة طرق منها مصافي الفحم المشبعة بيوديد البوتاسيوم أو مصافي الزيولايت المشبعة بنترات الفضة . وهناك أيضاً بعض الأنوية المشعة في البخار مثل ^{24}Na ونواتج التآكل ونواتج الانشطار مثل ^{91}Sr و ^{99m}Tc و ^{137}Cs . وتظهر هذه الأنوية على هيئة الرذاذ ، ويلخص الجدول (5–8) الغازات المنطلقة من مفاعلات BWR , PWR التجارية الألمانية والتي تشكل ≤1٪ من القيم المسموح بها بيئياً . ويبين الشكل (18–8) تفاصيل الفضلات الغازية .



شكل 8-18 : نظام إدارة الفضلات في مفاعل PWR (باللغة الإنجليزية)

8-12-2 الفضلات السائلة Liquid Wastes

تظهر نواتج الانشطار والتآكل على هيئة أيونـات ذائبـة أو راسبـة في الخثـارة وذلك حسب الظروف الكيميائية والمائية . ومن أهم نواتـج التـآكل ^{51}Cr و ^{59}Fe و ^{58}Co و ^{60}Co و ^{65}Zn و ^{124}Sb ومن أهم نواتـج الانشـطار T و ^{131}I و ^{134}Cr و ^{137}Cs . وتنطلق بقية نواتج الانشطار والأكتنيدات بكميات صغيرة حسب نـوع وحجم تسرب عنصر الوقود . وتتم إزالـة هـذه النواتـج باسـتمرار مـن قبـل دائـرة التبريد . وفي مفـاعلات PWR يسـحب تيـار مـن السـائل باسـتمرار مـن المبرد في الدائرة الرئيسية الموجودة في الجهة الخلفية لمبادل الحرارة الرئيسي . وبعد التبريد في مبادل حراري آخر يسمح للماء بالمرور في مصفاة (حجم الفتحة 25µ) وفي مبـادل أيوني يزيل الأيونات والدقائق . ويبين الشكل (8–18) تفـاصيل مجـاري الفضـلات السائلة مبينة سرعة الجيران والنشاط الإشعاعي .

ولقد صمم النظام ليسمح في فصل مجاري الفضلات حسب خواصها وطريقة معالجتها . وتتولد كمية كبيرة من الفضلات السائلة عن مولد البخار الثانوي ، كما تتولد أكبر كمية من النشـاط الإشـعاعي مـن أنظمـة التنقيـة مثـل المصـافي والمبـادل الأيونــي . ويتكــون المبــادل الأيونــي مــن مــادة غــير عضويــة كالكيســـلغوهر Kieselghur أو مبادل أيوني عضوي ، وأكثرها فعاليـة نظـام بودكـس Powdex الذي يتكون من مسحوق ناعم جداً (~ 400 مشMesh) من مبادل أيوني عضوي موجب وسالب . وينظر إلى نظام حـامض البوريك في مفـاعلات PWR علـى أنـه جزء من دائرة التنظيف أو التنقية .

وتحتوي مفاعلات BWR على دائرتي تنقيـة للسـوائل . الأولى بعـد المكثـف والثانية تسحب تيار صغير من أسـفل وعـاء المفـاعل . وتحتـوي تنقيـة المكثـف علـى

مبادل أيوني كما في PWR . ويتكون نظام تنقية وعاء المفاعل من نظام تبادل أيوني مختلط ومن مواد تنقية أخرى كالمغناتيت والكيسلغوهر . وتبلغ سعة نظام التنقية 50م^3/الساعة .

يصل النشاط الإشعاعي إلى قيم عالية في أنظمة التنقية ، والحد الأقصى لجرعة الامتصاص لراتنجات التبادل الأيوني العضوية هو 10^8 راد . كما يعاد غسل المصافي وتبديل الراتنجات بطريقة التحكم عن بُعد في حال أظهرت القياسات تسرب كميات كبيرة من الإشعاعات وفي الوقت الحاضر لا تتم عملية التجديد للراتنجات .

وإذا أظهرت المصافي والمبادلات الأيونية قصور في أدائها في تنقية الماء الدائر والماء الذي سيخرج إلى البيئة وجب إضافة نظام تبخير . علماً بأن نظام التبخير من الأجزاء الموجودة في دائرة التحكم بحامض البوريك في مفاعل PWR .

ويبين الجدول (5–8) السوائل المنطلقة من مفاعلي PWR و BWR الألمانية. ولا تتعدى الكميات المنطلقة أجزاء من مئة من القيم المسموح فيها ، وتعزى الزيادة في النشاط الإشعاعي للأنهار إلى النشاط الإشعاعي للماء المنصرف من المفاعل فتصل إلى 3×10^{-10} كوري/م^3 في نهر القزر وإلى 1×10^{-11} كوري/م^3 في نهر الراين . والكميات المسموح بخروجها إلى البيئة سنوياً هي 10^4 كوري T و 10^2 كوري من الأنوية التي تطلق β و γ و 50 كوري من الأنوية التي تطلق α . وتحسب الآن الكميات المسموح بانطلاقها من كل محطة نووية آخذين بعين الاعتبار بناءها وموقعها والتوزيع السكاني المحيط بها .

محطات الطاقة Site of power plant	النوع Type	تاريخ التشغيل التجاري First commercial operation	السعة القصوى Maximum gross capacity (M We)	الصرف الغازي Gaseous effluents: الغازات النبيلة Noble gases	Aerosols: قصيرة العمر Short lived	Aerosols: طويلة العمر Long lived [a]	^{131}I	^{14}C[b]	^{3}T	الصرف السائل Liquid effluents: نواتج الانشطار والتنشيط بدون T^3 Fission and activation products (without ^{3}T)	^{3}T
Gundremmingen	BWR	1966	250	7 400	9	0.008	0.25	2	~100	1.1	125
Lingen	BWR	1968	252	35 000	8.8	0.01	1.3	2	~30	0.045	16
Obrigheim	PWR	1968	345	8 000	0.003	0.026	0.012	3	27	1.8	150
Stade	PWR	1972	662	1 300	n.b.	0.03	0.01	5	15	0.13	114
Würgassen	BWR	1972	670	120	2	0.011	0.001	2	~2	0.89	3.6
Würgassen		Permitted releases		30 000	10.5		0.26			17	300
Biblis A	PWR	1974	1204	1 700	0.047	0.006	0.005	8	~13	0.38	106
Biblis A		Permitted releases		9×10^5	3.5		0.7			10	1600

جدول 5–8 : الكميات المنطلقة من محطات الوقود النووية في عام 1975 (في ألمانيا الغربية) .

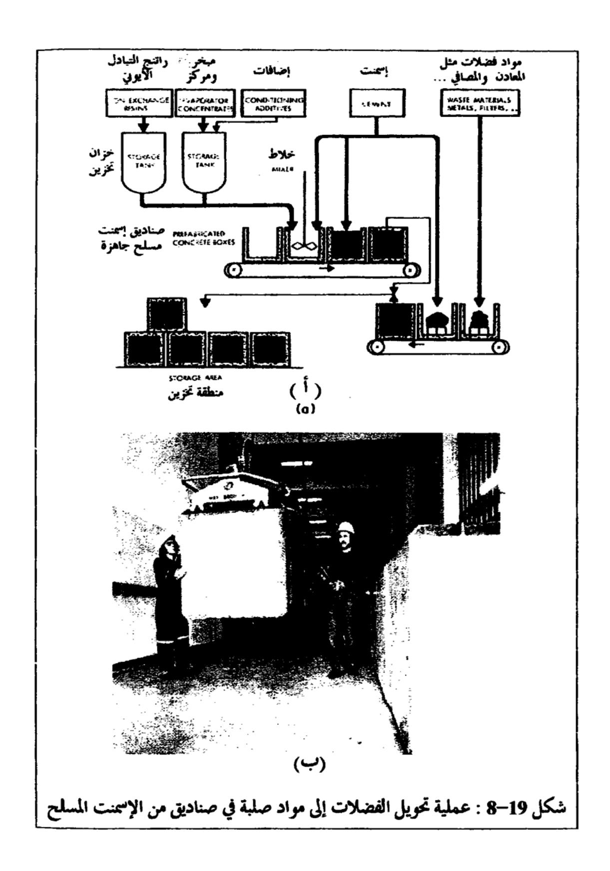
8-12-3 الفضلات الصلبة Solid Wastes

تنتج الفضلات المشعة الصلبة من العديد من مكونات ودوائر تنقية المحطة النووية . ويزال التلوث من العديد من المواد الملوثة بطرق المعالجة المناسبة وذلك لتوفير المال وأماكن تخزين الفضلات . ويتم تركيز المواد الصلبة القابلة للاحتراق باستخدام أجهزة الحرق Incinerator . وتستخدم عدة طرق في تثبيت الفضلات الصلبة بحيث يمكن تخزينها بسلامة وبأقل مراقبة . ولهذا فإنها توضع داخل مواد غير ذائبة تأخذ شكل القطع ذات الحجم والنشاط الإشعاعي الصغيرين وبحيث نستطيع التعامل معها باستخدام الرافعة الشوكية .

وتختلف كميات الفضلات الصلبة من محطة إلى أخرى بناء على الطرق المستخدمة في التنقية والتركيز . ويقدر المعدل السنوي لمفاعل LWR 1000 ميغاواط كهرباء من الفضلات الصلبة على النحو التالي :

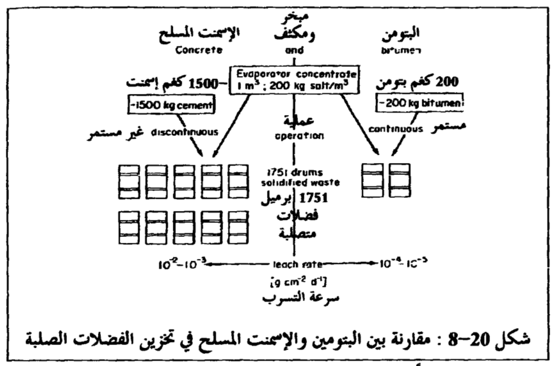
- 30م^3 راتنجات التبادل الأيوني المنهكة (المستخدمة كثيراً) (~ 50٪ ماء).
- 20م^3 (~ 80٪ ماء) مخلفات التبخير .
- 60م^3 من المواد المركزة من المصافي والمكثفات .
- 5 طن من الفضلات الناتجة عن دوائر المفاعل الرئيسية .
- 200م^3 (~ 40 طن) من الفضلات ذات النشاط الإشعاعي القليل .

ويقدر النشاط الإشعاعي في الراتنج بحوالي 200–500 كوري ^{60}Co و 300–3000 كوري ^{137}Cs وأقل من 200 كوري ^{90}Sr وفي المواد المركزة من المصافي والمبخرات بأقل من $\frac{1}{10}$ من الموجود في الراتنج .



شكل 19–8 : عملية تحويل الفضلات إلى مواد صلبة في صناديق من الإسمنت المسلح

ويوضح الشكل (19–8) عملية تحويل الفضلات إلى مواد صلبة لتثبيتها في الأسمنت باستخدام صناديق الإسمنت المسلح الجاهزة . وتصلح هذه الطريقة للأدوات الملوثة والمنشطة وللراتنجات وللبقايا الصلبة ... إلخ . وتؤدي هذه الطريقة إلى الزيادة في حجم الفضلات بحوالي من 4 إلى 40 مرة من الفضلات غير المحمية . ومن مزايا الإسمنت المسلح أنه رخيص الثمن ومقاوم للحريق وللتآكل ، إلا أنه يمكن للأيونات المشعة الذائبة في الماء أن تمر عبره بواسطة الماء ، كالسيزيوم . وقد اقترح العلماء لمعالجة هذه المشكلة إضافة مواد رابطة بلاستيكية إلى الإسمنت المسلح والبتومن لتستخدم كمواد تخزين . وفي حال استخدام البتومن لابُد من إزالة الماء لتقليل حجم الفضلات ومن وضع مخلوط البتومن في براميل فولاذية حجمها من 150–200 لتر وفي حال احتجنا إلى وقاية وحجب أكثر توضع البراميل في أكمام بسهل التخلص منها أو إعادة استعمالها من الإسمنت المسلح أو الحديد أو الرصاص . ويزن كم الرصاص 7طن وسمكه 12سم ويقلل معدل الجرعة السطحية بحوالي 10^3 مرة من 100 ريم/الساعة ،والتي تستدعي استخدام التحكم عن بُعد عند التعامل معها في غياب الواقي . ويقارن الشكل (20–8) بين عملية استخدام الإسمنت والبتومن . ومن مزايا البتومن صغر حجم الفضلات وقلة سرعة مرور الأيونات عبره ومن عيوبه قابليته للاحتراق وقلة مقاومته للإشعاعات ، وقد يؤدي احتراقه إلى انطلاق آلاف الكوري من الأنوية طويلة العمر . ويفضل البتومن في حال كانت الفضلات الصلبة ذات نشاط متوسط وقليل ، وهو أفضل مادة تثبيت في الوقت الحاضر .



شكل 20-8 : مقارنة بين البتومين والإسمنت المسلح في تخزين الفضلات الصلبة

وينتج سنوياً حوالي 270 برميل بتومن سعة 200 لتر مملوءة بالفضلات المركزة من مفاعل 1300 ميغاواط كهرباء في ألمانيا ، منها 50 برميل مملوء بالفضلات المتوسطة النشاط الإشعاعي والمحاطة بواقي من الإسمنت المسلح .

وإذا لم تحتوي الفضلات المتصلبة على نواتج الانشطار فإن زمن تخزينها 50 عام . وهذه الفترة الزمنية كافية لتحلل الأنوية المشعة مثل ^{60}Co إلى كميات صغيرة جداً ، مما يسمح بتخزينها في موقع المفاعل . وإذا كانت كمية ^{90}Sr و ^{137}Cs والأكتيدات عالية فلا بُد من تخزينها لزمن أطول في مواقع تخزين خاصة . ويفضل فصل هذه النواتج عن بقية الفضلات لإضافتها إلى الفضلات عالية النشاط في مصانع إعادة التصنيع .

وأدت الإشعاعات المنطلقة من محطات الطاقة النووية في ألمانيا الغربية (سابقاً) عام 1974 إلى زيادة في الجرعة الكلية التي تتعرض لها الجماهير بحوالي <0.01 مليريم ، وهذه كمية صغيرة يصعب قياسها .

8-13 الاندماج النووي Nuclear Fusion

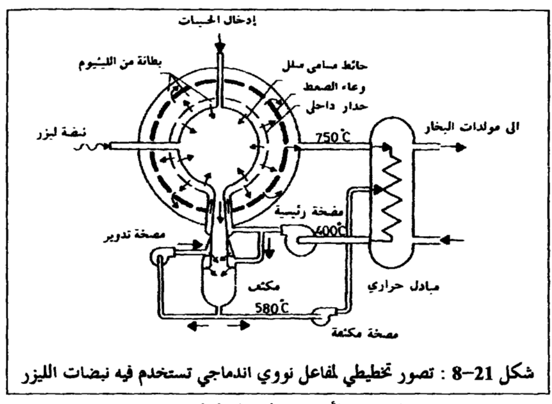
أجبرت مشكلة الفضلات المشعة الإنسان على التفكير في الاندماج النووي كوسيلة لإنتاج الطاقة . وتتم هذه العملية عند اندماج نظيرين لكل منهما عدد كتلي صغير ، ليتكون نظير أثقل منهما . فتفاعل الاندماج الذي يحدث في القنبلة الهيدروجينية هو :

$$ {}_{1}^{2}H + {}_{1}^{2}H \rightarrow {}_{2}^{3}He + {}_{0}^{1}n + \text{طاقة} \qquad (8-20) $$

وهو أحد التفاعلات التي تجري في الشمس وتساهم في إنتاج الطاقة الشمسية . وبالرجوع إلى الفصل الثاني نجد أن طاقة الاندماج نابعة عن تكون نظير أثقل ، له طاقة ربط نووي لكل نيوكلون أعلى من تلك التي للنظائر الخفيفة الداخلة في عملية الاندماج. كما أن كتلة النظير الناتج أقل من مجموع كتل النظائر المندمجة وهذا الفرق في الكتلة يتحول إلى طاقة حسب معادلة أينشتاين . وتحتاج تفاعلات الاندماج إلى طاقة تنشيط عالية للتغلب على قوى التنافر بين نواة كل من النظائر الخفيفة وغيرها . لهذا لابُد من حدوث الاندماج على درجات حرارة عالية تُكسب نوى النظائر المندمجة طاقة حركية عالية تتغلب بها على طاقة التنافر . وقد قدرت درجة الحرارة بحوالي 40 مليون درجة مئوية . والطريقة الوحيدة للحصول على درجة الحرارة تلك هي تفاعل الانشطار. ولهذا تستخدم قنبلة انشطار لتوفر الظروف للبدء في الاندماج حتى إذا ما بدأ أو استمر ، فإنه يضمن بقاء درجة الحرارة عالية بسبب ما ينتج عنه من طاقة . وهذه العملية ممكنة التطبيق في الاستخدامات العسكرية . إلا أنها صعبة في الاستخدامات السلمية للحصول على الطاقة الكهربائية . لذلك تتركز الأبحاث في الوقت الحاضر على استخدام أشعة الليزر ذات الطاقة العالية للوصول إلى درجات الحرارة العالية الضرورية لبدء عملية الاندماج (الشكل 21–8) ومن مزايا الاندماج التي يتفوق بها على الانشطار ما يلي:

أ – كمية الطاقة الناجمة عن الاندماج أعلى كثيراً من تلك الناتجة عن الانشطار .

ب– الوقود اللازم للاندماج غير مهدد بأن ينضب ، بينما قد ينضب وقود الانشطار خلال القرون القليلة القادمة .



شكل 21–8 : تصور تخطيطي لمفاعل نووي اندماجي تستخدم فيه نبضات الليزر

ومن تفاعلات الاندماج الأخرى ، التفاعل التالي :

$${}^{2}_{1}H+{}^{2}_{1}H\rightarrow{}^{1}_{1}H+{}^{3}_{1}H \qquad (8-21)$$

ويوجد الديوتيريوم بنسبة 1٪ من الهيدروجين الموجود في الماء الطبيعي . فلو استغل جزء بسيط من الديوتيريوم الموجود في مياه المحيطات لكان كفيلاً بإنتاج طاقة أكبر بمئات الآلاف من المرات من طاقة الانشطار .

جـ– ليست هناك خطورة من نواتج الاندماج ، حيث أنها غير مشعة ، وليست هناك مشكلة في عملية التخلص منها .

د – إن عملية التحكم في تفاعل الاندماج سهلة للغاية ، وذلك لأن الوقود لا يوجد في المفاعل ، وإنما تجري إضافته بالتدريج .

تم بحمد الله

والسلام عليكم   المؤلف

TABLE OF NUCLIDES

ملحق - أ -

Nuclide Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
0	n	1	10.6 m	β^-, no γ	8.071	1/2+	
1	H	1	*99.985%*		7.289	1/2+	0.332
		2	*0.0148%*		13.136	1+	5.2×10^{-4}
		3	12.33 y	β^-, no γ	14.950	1/2+	$<6\times10^{-6}$ sc
2	He	3	*1.38×10^{-4}%*		14.931	1/2+	$5.33\times10^{3}_{np}$
		4	*99.99986%*		2.425	0+	
		6	0.808 s	β^-, no γ	17.597	0+	
		8	0.122 s	β^-, β^-n 12%	31.609	0+	
3	Li	6	*7.5%*		14.087	1+	$942_{n\alpha}$
		7	*92.5%*		14.908	3/2−	0.045^{rs}
		8	0.84 s	$\beta^-2\alpha$	20.947	2+	
		9	0.178 s	β^-, $\beta^-n2\alpha$ 35%	24.955	(3/2)−	
		11	8.5 ms	β^-, β^-n 61%	40.94		
4	Be	7	53.3 d	EC	15.770	3/2−	$5\times10^{4\,rs}$
		9	*100%*		11.348	3/2−	0.008^{np}
		10	1.6×10^{6} y	β^-, no γ	12.608	0+	$<0.001^{rs}$
		11	13.8 s	β^-, $\beta^-\alpha$ 3%	20.176	1/2+	
		12	11.4 ms	β^-, β^-n	25.03	0+	
5	B	8	0.769 s	$\beta^+2\alpha$	22.922	2+	
		10	*19.8%*		12.052	3+	$3838_{n\alpha}$
		11	*80.2%*		8.668	3/2−	0.005^{rs}
		12	20.4 ms	β^-, $\beta^-3\alpha$ 1.6%	13.370	1+	
		13	17.4 ms	β^-, β^-n 0.28%	16.562	3/2−	
		14	16 ms	β^-	23.657	2−	
6	C	9	0.1265 s	$\beta^+p2\alpha$	28.912	(3/2−)	
		10	19.2 s	β^+	15.703	0+	
		11	20.38 m	β^+ 99.76%, EC 0.24%, no γ	10.650	3/2−	
		12	*98.89%*		0	0+	0.0034
		13	*1.11%*		3.125	1/2−	9×10^{-4}
		14	5730 y	β^-, no γ	3.020	0+	$<1\times10^{-6\,rs}$
		15	2.449 s	β^-	9.873	1/2+	
		16	0.75 s	β^-n >98.8%	13.693	0+	
7	N	12	11.0 ms	β^+, $\beta^+3\alpha$ 3.5%	17.338	1+	
		13	9.96 m	β^+, no γ	5.346	1/2−	
		14	*99.63%*		2.863	1+	1.82^{sc}_{np}
		15	*0.366%*		0.102	1/2−	$4\times10^{-5\,rs}$
		16	7.13 s	β^-, $\beta^-\alpha$ 0.0012%	5.682	2−	
		17	4.17 s	β^-, β^-n 95%	7.870	1/2−	
		18	0.63 s	β^-	13.274	0,1,2−	
8	O	13	8.9 ms	β^+p	23.105	3/2−	
		14	70.60 s	β^+	5.008	0+	
		15	122 s	β^+ 99.89%, EC 0.11%, no γ	2.855	1/2−	
		16	*99.76%*		−4.737	0+	$1.8\times10^{-4\,rs}$
		17	*0.038%*		−0.810	5/2+	$0.235^{sc}_{n\alpha}$
		18	*0.204%*		−0.783	0+	1.6×10^{-4}
		19	26.9 s	β^-	3.331	5/2+	
		20	13.5 s	β^-	3.799	0+	
9	F	17	64.5 s	β^+, no γ	1.952	5/2+	
		18	109.8 m	β^+ 96.9%, EC 3.1%, no γ	0.872	1+	
		19	*100%*		−1.487	1/2+	0.010^{rs}
		20	11.0 s	β^-	−0.017	2+	
		21	4.32 s	β^-	−0.047	5/2+	
		22	4.23 s	β^-	2.826	4+	
		23	2.2 s	β^-	3.35	(5/2)+	
10	Ne	17	0.109 s	β^+p	16.478	1/2−	
		18	1.67 s	β^+	5.319	0+	
		19	17.3 s	β^+ 99+%, EC 0.102%	1.751	1/2+	
		20	*90.51%*		−7.043	0+	0.038^{rs}
		21	*0.27%*		−5.733	3/2+	0.7^{rs}

Nuclide Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
10	Ne	22	*9.22%*		−8.026	0+	0.05^{rs}
		23	37.6 s	β^-	−5.155	5/2+	
		24	3.38 m	β^-	−5.949	0+	
		25	0.60 s	β^-	−2.15	(1/2)+	
11	Na	20	0.446 s	β^+,$\beta^+\alpha$ 21%	6.844	2+	
		21	22.47 s	β^+	−2.186	3/2+	
		22	2.602 y	β^+ 90.5%,EC 9.5%	−5.184	3+	3.2×10^4
		23	*100%*		−9.530	3/2+	0.43_m 0.10_g
		24	15.02 h	β^-	−8.418	4+	
		24m	20.2 ms	IT,β^-(weak)	−7.945	1+	
		25	60 s	β^-	−9.357	5/2+	
		26	1.07 s	β^-	−6.888	3+	
		27	0.30 s	β^-,β^-n 0.08%	−5.63	3/2,5/2+	
		28	31 ms	β^-,β^-n 0.6%	−1.13	1+	
		29	43 ms	β^-,β^-n 15%	2.66		
		30	54 ms	β^-,β^-n 33%	8.38		
		31	17 ms	β^-,β^-n 30%	10.61		
		32	14.5 ms	β^-	16.41		
		33	0.02 s	β^-			
12	Mg	21	123 ms	β^+p	10.912	5/2+	
		22	3.86 s	β^+	−0.394	0+	
		23	11.3 s	β^+	−5.471	3/2+	
		24	*78.99%*		−13.931	0+	0.053^{rs}
		25	*10.00%*		−13.191	5/2+	0.18^{rs}
		26	*11.01%*		−16.212	0+	0.038
		27	9.46 m	β^-	−14.585	1/2+	0.15^{rs}
		28	21.0 h	β^-	−15.016	0+	
		29	1.4 s	β^-	−10.75	(3/2+)	
		30	1.2 s	β^-	−9.79 s	0+	
13	Al	23	0.47 s	β^+,β^+p	6.768		
		24	2.07 s	β^+,$\beta^+\alpha$ 0.0077%	−0.052	4+	
		24m	0.13 s	IT 93%,β^+ 7%,$\beta^+\alpha$	0.387	1+	
		25	7.18 s	β^+	−8.913	5/2+	
		26	7.2×10^5 y	β^+ 82%,EC 18%	−12.208	5+	~
		26m	6.36 s	β^+,no γ	−11.979	0+	
		27	*100%*		−17.194	5/2+	0.231
		28	2.24 m	β^-	−16.848	3+	
		29	6.6 m	β^-	−18.212	5/2+	
		30	3.69 s	β^-	−15.89	(2,3)+	
		31	0.64 s	β^-	−15.10	5/2,3/2+	
14	Si	25	0.22 s	β^+,β^+p	3.824	3/2,5/2+	
		26	2.21 s	β^+	−7.143	0+	
		27	4.13 s	β^+	−12.385	5/2+	
		28	*92.23%*		−21.491	0+	0.17^{rs}
		29	*4.67%*		−21.894	1/2+	0.10^{rs}
		30	*3.10%*		−24.432	0+	0.108
		31	2.62 h	β^-	−22.949	3/2+	0.5^{rs}
		32	≈650 y	β^-,no γ	−24.092	0+	
		33	6.2 s	β^-	−20.57		
		34	2.8 s	β^-	−19.85	0+	
15	P	28	270 ms	β^+	−7.160	3+	
		29	4.1 s	β^+	−16.949	1/2+	
		30	2.50 m	β^+,EC	−20.204	1+	
		31	*100%*		−24.440	1/2+	0.18^{rs}
		32	14.28 d	β^-,no γ	−24.305	1+	
		33	25.3 d	β^-,no γ	−26.337	1/2+	
		34	12.4 s	β^-	−24.55	1+	
		35	47 s	β^-	−24.94	(1/2,3/2)+	
16	S	29	0.19 s	β^+,β^+p	−3.16	5/2+	
		30	1.2 s	β^+	−14.062	0+	
		31	2.6 s	β^+	−19.044	1/2+	
		32	*95.02%*		−26.015	0+	0.53^{rs}
		33	*0.75%*		−26.586	3/2+	0.09^{rs}_{ns}
		34	*4.21%*		−29.931	0+	0.24^{rs}
		36	87.4 d	β^-,no γ	−28.846	3/2+	

Z	Nuclide El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
16	S	36	*0.017%*				
		37	5.0 m	β^-	−30.666	0+	
		38	170 m	β^-	−26.908	5/2,7/2−	0 15^{rs}
					−26.862	0+	
17	Cl	32	298 ms	β^+,β^+p ≈0.007%,			
				$\beta^+\alpha$ ≈0.01%	−13.329	1+	
		33	2.51 s	β^+			
		34	1.526 s	β^+,no γ	−21.003	3/2+	
		34m	32.0 m	β^+ 53%,IT 47%	−24.438	0+	
		35	*75.77%*		−24.292	3+	
					−29.014	3/2+	
		36	3.00×10^5 y	β^- 98.1%,EC 1.9%,			43
				β^+ 0.0017%,no γ	−29.522	2+	<1^{rs}
		37	*24.23%*				
					−31.762	3/2+	0.428$_g$
		38	37.3 m	β^-			0.005$_m$
		38m	0.715 s	IT	−29.798	2−	
		39	56 m	β^-	−29.127	5−	
		40	1.35 m	β^-	−29.803	3/2+	
		40	0.10 s?	β^-?	27.54	2−	
		41	34 s	β^-			
18	Ar	33	0.18 s	β^+,β^+p 34%	−27.40	(1/2,3/2)+	
		34	0.844 s	β^+	−9.385	1/2+	
		35	1.78 s	β^+	−18.379	0+	
		36	*0.337%*		−23.049	3/2+	
		37	35.0 d	EC,no γ	−30.231	0+	5^{rs}
		38	*0.063%*		−30.948	3/2+	
					−34.715	0+	
		39	269 y	β^-,no γ			0.8^{rs}
		40	*99.60%*		−33.241	7/2−	600^{rs}
		41	1.83 h	β^-	−35.040	0+	0.64
		42	33 y	β^-,no γ	−33.068	7/2−	0 5^{rs}
		43	5.4 m	β^-	−34.42	0+	
		44	11.9 m	β^-	−31.98		
19	K	36	0.34 s	β^+	−32.271	0+	
		37	1 23 s	β^+	−17.426	2+	
		38	7.61 m	β^+	−24.799	3/2+	
		38m	0.93 s	β^+,no γ	−28.802	3+	
		39	*93.26%*		−28.671	0+	
		40	*0.0117%*	β^- 89.3%,EC 10.7%,	−33.806	3/2+	2.1^{rs}
			1.28×10^9 y	β^+ 0.0010%	−33.535	4−	
		41	*6.73%*				70^{rs}
		42	12.36 h	β^-	−35.560	3/2+	1.46
		43	22.3 h	β^-	−35.023	2−	
		44	22.1 m	β^-	−36.588	3/2+	
		45	20 m	β^-	−35.807	2−	
		46	115 s	β^-	−36.611	3/2+	
		47	17.5 s	β^-	−35.420	(2−)	
		48	6.8 s	β^-	−35.698	1/2+	
		49	≥2 s?	β^-	−32.22	(2−)	
		50	≈0.3 s?	β^-			
20	Ca	37	0.173 s	β^+,β^+p	−23.57 s		
		38	0.44 s	β^+	−13.164	3/2+	
		39	0.86 s	β^+,no γ	−22.060	0+	
		40	*96.94%*		−27.282	3/2+	
		41	1.0×10^5 y	EC,no γ	−34.847	0+	0.4^{rs}
		42	*0.647%*		−35.138	7/2−	
		43	*0.135%*		−38.544	0+	0.7^{rs}
		44	*2.09%*		−38.405	7/2−	6^{rs}
		45	165 d	β^-	−41.466	0+	0.88
		46	*0.0035%*		−40.810	7/2−	
		47	4.536 d	β^-	−43.138	0+	0.7^{rs}
		48	*0.187%*		−42.343	7/2−	
		49	8.72 m	β^-	−44.216	0+	1.1^{rs}
		50	14 s	β^-	−41.286	(3/2)−	
21	Sc	40	182 ms	β^+,β^+p	−39.572	0+	
		41	0.596 s	β^+,no γ	−20.527	4−	
		42	682 ms	β^+,no γ	−28.644	7/2−	
		42m	62.0 s	β^+	−32.121	0+	
					−31.503	7+	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_a(b)
21	Sc	43	3.89 h	β^++EC	−36.185	7/2−	
		44	3.93 h	β^+ 95%,EC 5%	−37.811	2+	
		44m	2.44 d	IT 98.61%,EC 1.39%	−37.540	6+	
		45	*100%*		−41.066	7/2−	17^{rs}_{g} 9^{rs}_{m}
		45m	0.31 s	IT	−41.054	3/2+	
		46	83.80 d	β^-	−41 756	4+	8^{sc}
		46m	18.7 s	IT	−41.613	1−	
		47	3.42 d	β^-	−44.330	7/2−	
		48	43.7 h	β^-	−44.498	6+	
		48	3 h?	?			
		49	57.0 m	β^-	−46.555	(7/2)−	
		50	1.71 m	β^-	−44.539	(5)+	
		50m	0.35 s	IT	−44.282	(2)+	
		51	12.4 s	β^-	−43.220	(7/2)−	
22	Ti	41	80 ms	β^+p	−15.78	3/2+	
		42	0.20 s	β^+	−25.122	0+	
		43	0.49 s	β^+,no γ	−29.324		
		44	47 y	EC	−37.546	0+	
		45	3.09 h	β^+,EC	−39.004	7/2−	
		46	*8.2%*		−44.123	0+	0.6^{rs}
		47	*7.4%*		−44.931	5/2−	1.7^{rs}
		48	*73.7%*		−48.488	0+	7.9^{rs}
		49	*5.4%*		−48.559	7/2−	2.1^{rs}
		50	*5.2%*		−51.432	0+	0.179
		51	5.80 m	β^-	−49.733	3/2−	
		52	1.7 m	β^-	−49.469	0+	
		53	33 s	β^-	−46.84	(3/2)−	
23	V	44	0.09 s	[β^+],$\beta^+\alpha$	−23.85 s		
		46	0.423 s	β^+,no γ	−37.071	0+	
		47	32.6 m	β^++EC	−42.001	3/2−	
		48	15.976 d	EC 50.4%,β^+ 49.6%	−44.473	4+	
		49	330 d	EC,no γ	−47.957	7/2−	
		50	*0.250%*		−49.219	6+	~50
		51	*99.750%*		−52.199	7/2−	4.88
		52	3.76 m	β^-	−51.439	3+	
		53	1.6 m	β^-	−51.863	7/2−	
		54	43 s	β^-	−49.93		
24	Cr	45	0.05 s	β^+p	−19.46	[7/2−]	
		46	0.26 s	β^+,no γ	−29.461	0+	
		48	21.56 h	EC	−42.818	0+	
		49	41.9 m	β^+,EC	−45.329	5/2−	
		50	*4.35%*		−50.258	0+	15.9
		51	27.70 d	EC	−51.448	7/2−	
		52	*83.79%*		−55.415	0+	0.8^{rs}
		53	*9.50%*		−55.284	3/2−	18^{rs}
		54	*2.36%*		−56.931	0+	0.38^{rs}
		55	3.55 m	β^-	−55.106	3/2−	
		56	5.9 m	β^-	−55.265	0+	
25	Mn	50	0.283 s	β^+,no γ	−42.626	0+	
		50m	1.74 m	β^+	−42.40	5+	
		51	46.2 m	β^++EC	−48.240	5/2−	
		52	5.59 d	EC 72%,β^+ 28%	−50.704	6+	
		52m	21.1 m	β^++EC 98.25%, IT 1.75%	−50.326	2+	
		53	3.7×10^6 y	EC,no γ	−54.687	7/2−	70^{rs}
		54	312 d	EC	−55.554	3+	$<10^{rs}$
		55	*100%*		−57.710	5/2−	13.3
		56	2.579 h	β^-	−56.909	3+	
		57	1.6 m	β^-	−57.487	5/2−	
		58	65 s	β^-	−55.802	3+	
		58	3.0 s	β^-,no γ	−55.832	(0+)	
26	Fe	49	0.07 s	[β^+],β^+p	−24.47		
		52	8.27 h	β^+ 57%,EC 43%	−48.332	0+	
		53	8.51 m	β^+,EC	−50.944	7/2−	
		53m	2.53 m	IT	−47.904	19/2−	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
26	Fe	54	*5.8%*		−56.251	0+	2.2^{rs}
		55	2.7 y	EC, no γ	−57.479	3/2−	
		56	*91.8%*		−60.604	0+	2.6^{rs}
		57	*2.15%*		−60.179	1/2−	2.4^{rs}
		58	*0.29%*		−62.152	0+	1.14
		59	44.6 d	β^-	−60.661	3/2−	
		60	3×10^5 y	β^-	−61.437	0+	
		61	6.0 m	β^-	−59.01	(3/2)−	
		62	68 s	β^-	−58.86	0+	
27	Co	53	0.26 s	β^+, no γ	−42.640	[7/2]	
		53m	0.25 s	β^+ ≈98.5%, p ≈1.5%	−39.453	[19/2−]	
		54	193.2 ms	β^+, no γ	−48.010	0+	
		54m	1.46 m	β^+	−47.811	(7+)	
		55	17.5 h	β^+ 77%, EC 23%	−54.024	7/2−	
		56	78.8 d	EC 81%, β^+ 19%	−56.037	4+	
		57	271 d	EC	−59.342	7/2−	
		58	70.8 d	EC 85.00%, β^+ 15.00%	−59.844	2+	1.9×10^3
		58m	9.2 h	IT	−59.819	5+	1.4×10^5
		59	*100%*		−62.226	7/2−	19_m 18_g
		60	5.271 y	β^-	−61.647	5+	2.0^{sc}
		60m	10.5 m	IT 99.75%, β^- 0.25%	−61.588	2+	58^{sc}
		61	1.65 h	β^-	−62.897	7/2−	
		62(g)	1.50 m	β^-	−61.430	(2)+	
		62(m)	13.9 m	β^-	−61.408	(5)+	
		63	27.5 s	β^-	−61.850	7/2,5/2−	
		64	0.3 s	β^-	−59.791	(1+)	
28	Ni	53	0.05 s	[β^+], β^+p	−29.41	[7/2−]	
		56	6.10 d	EC	−53.902	0+	
		57	36.0 h	EC 60%, β^+ 40%	−56.077	3/2−	
		58	*68.3%*		−60.224	0+	4.6^{rs}
		59	7.5×10^4 y	EC 99+%, β^+ 1.5×10^{-5}%, no γ	−61.153	3/2−	92_{α}
		60	*26.1%*		−64.470	0+	2.8^{rs}
		61	*1.13%*		−64.219	3/2−	2^{rs}
		62	*3.59%*		−66.745	0+	14.2
		63	100 y	β^-, no γ	−65.513	1/2	23^{rs}
		64	*0.91%*		−67.098	0+	1.49
		65	2.520 h	β^-	−65.124	5/2−	24^{sc}
		66	54.8 h	β^-, no γ	−66.021	0+	
		67	18 s	β^-	−63.47		
29	Cu	58	3.20 s	β^+	−51.662	1+	
		59	82 s	β^+	−56.352	3/2−	
		60	23.4 m	β^+ 93%, EC 7%	−58.343	2+	
		61	3.41 h	β^+ 62%, EC 38%	−61.981	3/2−	
		62	9.73 m	β^+ 97.8%, EC 2.2%	−62.796	1+	
		63	*69.2%*		−65.578	3/2−	4.4
		64	12.70 h	EC 41%, β^+ 19%, β^- 40%	−65.423	1+	
		65	*30.8%*		−67.262	3/2−	2.17
		66	5.10 m	β^-	−66.257	1+	140^{sc}
		67	61.9 h	β^-	−67.305	3/2−	
		68	31 s	β^-	−65.39	1+	
		68m	3.8 m	IT 86%, β^- 14%	−64.66	(6−)	
		69	3.0 m	β^-	−65.94	(3/2)−	
		70(g)	5 s	β^-	−63.39	1+	
		70(m)	47 s	β^-	−63.25	(5−)	
30	Zn	57	0.04 s	[β^+], β^+p	−32.61	[7/2−]	
		60	2.4 m	β^+ ≈97%, EC ≈3%	−54.184	0+	
		61	89.1 s	β^+ ≈99%, EC ≈1%	−56.58	3/2−	
		62	9.2 h	EC 93%, β^+ 7%	−61.169	0+	
		63	38.1 m	β^+ 93%, EC 7%	−62.211	3/2−	
		64	*48.6%*		−66.001	0+	0.78
		65	244.1 d	EC 98.54%, β^+ 1.46%	−65.910	5/2−	
		66	*27.9%*		−68.898	0+	1^{rs}

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
30	Zn	67	*4.10%*		−67.880	5/2−	7^{rs}
		68	*18.8%*		−70.006	0+	0.81_g 0.072_m
		69	56 m	β^-	−68.417	1/2−	
		69m	14.0 h	IT 99+%, β^- 0.033%	−67.978	9/2+	
		70	*0.62%*		−69.560	0+	0.09_g 0.0082_m
		71	2.4 m	β^-	−67.324	1/2−	
		71m	3.9 h	β^-	−67.167	(9/2)+	
		72	46.5 h	β^-	−68.134	0+	
		73	24 s	β^-	−65.03		
		74	95 s	β	−65.67	0+	
		75	10.2 s	β^-	−62.46 s		
		76	5.7 s	β^-	−62.55	0+	
		77	1.4 s	β^-	−58.91 s		
		79	2.6 s?	β^-n			
31	Ga	62	118 ms	β^+	−51.77 s	(0+)	
		63	32 s	β^+	−56.69	3/2,5/2−	
		64	2.62 m	β^++EC	−58.836	0+	
		65	15.2 m	β^+ 86%, EC 14%	−62.654	3/2−	
		66	9.4 h	β^+ 56.5%, EC 43.5%	−63.723	0+	
		67	78.3 h	EC	−66.878	3/2−	
		68	68.1 m	β^+ 90%, EC 10%	−67.085	1+	
		69	*60.1%*		−69.322	3/2−	1.7
		70	21.1 m	β^- 99.8%, EC 0.2%	−68.905	1+	
		71	*39.9%*		−70.142	3/2−	4.6
		72	14.10 h	β^-	−68.591	3−	
		73	4.87 h	β^-	−69.73	(3/2)−	
		74	8.1 m	β^-	−68.02	(4)−	
		74m	10 s	IT	−67.96	1+	
		75	2.10 m	β^-	−68.56	(3/2−)	
		76	27.[illegible] s	β^-	−66.44	(3−)	
		77	13 s	β^-	−66.41 s		
		78	5.1 s	β^-	−63.68		
		79	3.0 s	β^-	−62.80		
		80	1.66 s	β^-, β^-n	−59.53 s		
		81	1.2 s	β^-, β^-n			
		82	0.60 s?	[β^-], β^-n			
		83	0.31 s	[β^-], β^-n			
32	Ge	64	64 s	β^++EC	−54.43	0+	
		65	31 s	β^++EC, (β^++EC)p 0.013%	−56.41	3/2,5/2−	
		66	2.3 h	EC 73%, β^+ 27%	−61.621	0+	
		67	19.0 m	β^+ 96%, EC 4%	−62.45	(1/2)−	
		68	288 d	EC, no γ	−66.972	0+	
		69	39.0 h	EC 64%, β^+ 36%	−67.096	5/2−	
		70	*20.5%*		−70.561	0+	3.2^{rs}
		71	11.2 d	EC, no γ	−69.906	1/2−	
		72	*27.4%*		−72.583	0+	1.0^{rs}_{g+m}
		73	*7.8%*		−71.294	9/2+	15^{rs}
		73m	0.50 s	IT	−71.227	1/2−	
		74	*36.5%*		−73.422	0+	0.4^{rs}_g 0.16^{rs}_m
		75	82.8 m	β^-	−71.856	1/2−	
		75m	48 s	IT 99.97%, β^- 0.03%	−71.716	7/2+	
		76	*7.8%*		−73.214	0+	0.10^{rs}_m 0.06^{rs}_g
		77	11.30 h	β^-	−71.214	7/2(+)	
		77m	53 s	β^- 80%, IT 20%	−71.055	1/2−	
		78	1.45 h	β^-	−71.76	0+	
		79	19 s?	β^-			
		79	42 s	β^-	−69.56	(1/2)−	
		80	29 s	β^-	−69.43	0+	
		81	10 s	β^-	−66.34 s		
		82	4.6 s	β^-	−65.99 s	0+	
		83	1.9 s	β^-	−≈62.5 s		

Nuclide			Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_a(b)
Z	El	A					
32	Ge	84	1.2 s	β^-		0+	
33	As	68	2.6 m	β^+	−58.77 s		
		69	15 m	β^+ 98%,EC 2%	−63.12	(5/2)−	
		70	53 m	β^+ 84%,EC 16%	−64.339	4(+)	
		71	61 h	EC 68%,β^+ 32%	−67.893	5/2−	
		72	26.0 h	β^+ 77%,EC 23%	−68.232	2−	
		73	80.3 d	EC	−70.949	3/2−	
		74	17.78 d	EC 37%,β^+ 31%, β^- 32%	−70.860	2−	
		75	*100%*		−73.034	3/2−	4.4
		76	26.3 h	β^-	−72.291	2−	
		77	38.8 h	β^-	−73.916	3/2−	
		78	91 m	β^-	−72.74	(2−)	
		79	9.0 m	β^-	−73 71	3/2−	
		80	16 s	β^-	−72.06	i(+)	
		81	33 s	β^-	−72.64	(3/2)−	
		82	14 s	β^-		(5−)	
		82	19 s	β^-	−70.39	(1+)	
		83	13 s	β^-	−69.87		
		84	0.6 s	β^-	−66.16 s		
		84	5.3 s	β^-,β^-n 0 1%	−66.16 s	(1−)	
		85	2.03 s	β^-,β^-n 23%	−63 52 s		
		86	0.9 s	β^-,β^-n ≈4%	−59.7 s		
		87	0.6 s	β^-	−≈56.2 s		
34	Se	68	1.6 m	β^+	−54.17 s	0+	
		69	27.4 s	β^+,β^+p 0.07%	−56.30		
		70	41.1 m	β^++EC	−61.74 s	0+	
		70m	4 m?	β^++EC			
		71	4.9 m	β^++EC	−63.46	(5/2)−	
		72	8.4 d	EC	−67.894	0+	
		73	7.1 h	β^+ ≈65%,EC ≈35%	−68.209	7/2+	
		73m	41 m	IT 73%,(β^+,EC) 27%	−68.183	1/2−	
		74	*0.87%*		−72.213	0+	52
		75	118.5 d	EC	−72.169	5/2+	
		76	*9.0%*		−75.259	0+	64_g 21_m^{rs}
		77	*7.6%*		−74.606	1/2−	42^{rs}
		77m	17.4 s	IT	−74.444	7/2+	
		78	*23.5%*		−77.032	0+	0.4_{g+m} 0.3_m^{rs}
		79	≤6.5×10⁴ y	β^-,no γ	−75.911	7/2+	
		79m	3.90 m	IT	−75.815	1/2−	
		80	*49.8%*		−77.761	0+	0.6_g 0.07_m
		81	18.5 m	β^-	−76.391	(1/2)−	
		81m	57.3 m	IT 99+%,β^- 0.058%	−76.288	(7/2)+	
		82	*9.2%* 1.4×10²⁰ y	$\beta^-\beta^-$	−77.586	0+	0.04_m 0.006_g
		83	22.5 m	β^-	−75.333	(9/2)+	
		83m	70 s	β^-	−75.105	(1/2)−	
		84	3.3 m	β^-	−75.942	0+	
		85	31 s	β^-	−72 57 s		
		85	19 s?	β^-			
		86	16 s	β^-	−70.86 s	0+	
		87	5.8 s	β^-,β^-n 0.16%	−≈66.2 s		
		88	1.5 s	β^-,β^-n 0.8%	−64.09 s	0+	
		89	0.41 s	[β^-],β^-n 5%	−59.89 s		
		91	0.27 s	β^-,β^-n ≈21%			
35	Br	70	23 s?	β^+p	−51.29 s		
		71	<1 m?	β^++EC	−56.86 s		
		72	1.31 m	β^+	−58.93 s	(3)	
		73	3.4 m	β^++EC	−63.67	(3/2−)	
		74	25.3 m	β^++EC	−65.295	(0,1−)	
		74	4 m?	β^+			
		74m	41 m	β^++EC	−≈65.1	(4−)	
		75	98 m	β^+ 76%,EC 24%	−69.159	(3/2−)	
		76	16.1 h	β^+ 57%,EC 43%	−70.303	1−	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
35	Br	77	57.0 h	EC 99.26%,β^+ 0.74%	-73.242	3/2-	
		77m	4.3 m	IT	-73.136	9/2+	
		78	6.46 m	β^+ 92%,EC 8%, β^- ≤0.01%	-73.458	1+	
		79	*50.69%*		-76.070	3/2-	10.8_g 2.4_m
		79m	4.9 s	IT	-75.863	9/2+	
		80	17.6 m	β^- 91.7%, EC 5.7%,β^+ 2.6%	-75.891	1+	
		80m	4.42 h	IT	-75.805	5-	
		81	*49.31%*		-77.976	3/2-	2.7_{g+m}
		82	35.34 h	β^-	-77.498	5-	
		82m	6.1 m	IT 97.6%,β^- 2.4%	-77.452	2-	
		83	2.39 h	β^-	-79.025	(3/2)-	
		84	31.8 m	β^-	-77.759	2-	
		84m	6.0 m	β^-	-77.46	(6-)	
		85	2.9 m	β^-	-78.67	3/2-	
		86	56 s	β^-	-75.96	(2-)	
		86	4.5 s?	[IT]			
		87	55.6 s	β^-,β^-n 2.3%	-74.21 s	(3/2-)	
		88	16.6 s	β^-,β^-n 6%	-71.09 s	(1-)	
		89	4.4 s	β^-,β^-n 13%	-69.09 s		
		90	1.9 s	β^-,β^-n 23%	-≈65.2 s		
		91	0.54 s	β^-,β^-n 9%			
		92	0.36 s	β^-,β^-n 16%	-≈57.8 s		
36	Kr	72	17 s	β^++EC	-53.87 s	0+	
		73	27 s	β^+,β^+p 0.7%	-56.98		
		74	11.5 m	β^+,EC	-62.02	0+	
		75	4.3 m	β^++EC	-64.16 s		
		76	14.8 h	EC	-69.10	0+	
		77	75 m	β^+ ≈80%,EC ≈20%	-70.236	(5/2+)	
		78	*0.356%*		-74.150	0+	5_g 0.21_m
		79	35.0 h	EC 93%,β^+ 7%	-74.439	1/2-	
		79m	50 s	IT	-74.309	7/2+	..
		80	*2.27%*		-77.897	0+	12_g 5_m
		81	2.1×10^5 y	EC	-77.654	7/2+	
		81m	13 s	IT	-77.464	1/2-	
		82	*11.6%*		-80.591	0+	23_g 20_m
		83	*11.5%*		-79.985	9/2+	200
		83m	1.83 h	IT	-79.943	1/2-	
		84	*57.0%*		-82.432	0+	0.09_m 0.042_g
		85	10.7 y	β^-	-81.472	9/2+	1.7
		85m	4.48 h	β^- 79%,IT 21%	-81.167	1/2-	
		86	*17.3%*		-83.263	0+	0.06^m
		87	76 m	β^-	-80.707	(5/2)+	
		88	2.84 h	β^-	-79.689	0+	
		89	3.18 m	β^-	-76.79		
		90	32.3 s	β^-	-75.18	0+	
		91	8.6 s	β^-	-71.77		
		92	1.84 s	β^-,β^-n 0.032%	-69.15	0+	
		93	1.29 s	β^-,β^-n 1.9%	-65.6		
		94	0.20 s	β^-,β^-n 6%	-≈61.32 s	0+	
		95	0.78 s	[β^-]			
37	Rb	74	65 ms	β^+,no γ	-51.43 s	(0+)	
		75	18 s	β^+	-57.51		
		76	39 s	β^+	-60.61		
		77	3.9 m	β^++EC	-65.11	(5/2-)	
		78	18 m	β^++EC	-68.8		
		78m	6 m	β^++EC,IT	-68.7		
		79	23.0 m	β^+ 84%,EC 16%	-70.86	(3/2,5/2-)	
		80	34 s	β^+	-72.190	1+	
		81	4.58 h	EC 73%,β^+ 27%	-75.392	3/2-	
		81m	32 m	β^++EC,IT	-75.307	9/2+	

Nuclide Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
37	Rb	82	1.25 m	β^+ 96%,EC 4%	−76.213	1+	
		82m	6.2 h	EC 74%,β^+ 26%	−≈76.1	5−	
		83	86.2 d	EC	−78.914	5/2−	
		84	32.9 d	EC 75%,β^+ 22%, β^- 3.0%	−79.752	2−	12^{rs}_{np}
		84m	20.5 m	IT	−79.288	(6+)	
		85	*72.17%*		−82.159	5/2−	0.40_g 0.047_m
		86	18.8 d	β^- 99+%,EC 0.005%	−82.738	2−	
		86m	1.02 m	IT	−82.182	6−	
		87	*27.83%* 4.8×10¹⁰ y	β^-,no γ	−84.596	3/2−	0.12^{rs}
		88	17.8 m	β^-	−82.602	2−	1.0^{rs}
		89	15.2 m	β^-	−81.717	(3/2−)	
		90	153 s	β^-	−79.57	(1−)	
		90m	258 s	β^-,IT	−79.46	(4−)	
		91	58 s	β^-	−77.97		
		92	4.52 s	β^-,β^-n 0.012%	−75.12	(1−)	
		93	5.85 s	β^-,β^-n 1.3%	−72.92		
		94	2.72 s	β^-,β^-n 10%	−68.82		
		95	0.38 s	β^-,β^-n 8.4%	−66.55		
		96	0.201 s	β^-,β^-n 13%	−62.77 s		
		97	0.170 s	β^-,β^-n 27%			
		98	0.13 s	β^-,β^-n 13%			
		99	76 ms	[β^-]			
38	Sr	77	9 s	β^+,β^+p ≤0.25%	−57.96		
		78	31 m	β^++EC	−65.5 s	0+	
		79	8.1 m	β^++EC	−65.46 s		
		79	4 m?	β^++EC			
		80	106 m	EC+β^+	−70.39 s	0+	
		81	26 m	β^+ ≈87%,EC ≈13%	−71.40	(1/2−)	
		82	25.0 d	EC,no γ	−75.999	0+	
		83	32.4 h	EC 76%,β^+ 24%	−76.664	7/2+	
		83m	5.0 s	IT	−76.405	1/2−	
		84	*0.56%*		−80.641	0+	0.6^{sc}_m 0.3_g
		85	64.8 d	EC	−81.095	9/2+	
		85m	68 m	IT 87%,EC 13%	−80.856	1/2−	
		86	*9.8%*		−84.512	0+	0.84^{sc}_m
		87	*7.0%*		−84.869	9/2+	
		87m	2.80 h	IT 99.7%,EC 0.3%	−84.480	1/2−	
		88	*82.6%*		−87.911	0+	0.0057^{rs}
		89	50.5 d	β^-	−86.203	5/2+	0.42^{rs}
		90	28.8 y	β^-,no γ	−85.935	0+	0.8^{rs}
		91	9.5 h	β^-	−83.666	5/2+	
		92	2.71 h	β^-	−82.892	0+	
		93	7.4 m	β^-	−80.28		
		94	75 s	β^-	−78.96	0+	
		95	24.4 s	β^-	−75.14		
		96	1.1 s	β^-	−73.07	0+	
		97	0.40 s	β^-	−69.08 s		
		98	0.7 s	β^-	−67.38 s	0+	
		99	0.6 s	β^-,β^-n 3%			
39	Y	81	5 m	β^++EC			
		82	12 m?	[β^+]	−67.91 s		
		83	7.1 m	β^+ ≈95%,EC ≈5%	−72.36 s	(9/2+)	
		83	2.85 m	β^++EC	−72.36 s	(1/2)−	
		84	39 m	β^++EC	−73.692		
		84	4.6 s	β^++EC		(1+)	
		85(g)	2.7 h	β^+ 55%,EC 45%	−77.855	(1/2)−	
		85(m)	4.9 h	β^+ 70%,EC 30%	−77.835	(9/2)+	
		86	14.74 h	EC 66%,β^+ 34%	−79.239	4−	
		86m	48 m	IT 99.31%, β^++EC 0.69%	−79.021	8+	
		87	80.3 h	EC 99.8%,β^+ 0.2%	−83.007	1/2−	
		87m	13 h	IT 98%, EC ≈2%,β^+ 0.75%	−82.626	9/2+	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_{γ}(b)
39	Y	88	106.6 d	EC 99+%,β^+ 0.210%	−84.298	4−	
		89	*100%*		−87.695	1/2−	1.2_{g} 0.0010_{m}
		89m	16.1 s	IT	−86.786	9/2+	
		90	64.1 h	β^-	−86.481	2−	$<6.5^{rs}_{g}$
		90m	3.19 h	IT 99+%,β^- 0.0021%	−85.799	7+	
		91	58.5 d	β^-	−86.350	1/2−	1.4^{m}
		91m	49.7 m	IT	−85.794	9/2+	
		92	3.54 h	β^-	−84.822	2−	
		93	10 2 h	β^-	−84.227	1/2−	
		93m	0.82 s	IT	−83.468	9/2+	
		94	18.7 m	β^-	−82.382	2−	
		95	10.3 m	β^-	−81.233	(1/2)−	
		96	9.8 s	β^-			
		96	6.0 s	β^-	−78.43	(0−)	
		97(g)	3.7 s	β^-	−76.28	(1/2−)	
		97(m)	1.21 s	β^- ≥99.3%, IT(?) ≤0.7%	−75.61	(9/2)+	
		98	0.6 s	β^-	−73.19 s	(1+)	
		98	2.0 s	β^-	−73.19 s		
		99	1.4 s	β^-,β^-n 1%	−71.50		
		100	0.8 s	β^-	−67.96 s		
		102	0.9 s?	[β^-]	−63.36 s		
40	Zr	81	≈11 m	[β^+]			
		82	10 m	[β^++EC]		0+	
		83	≈8 m	[β^+]	−≈65.4 s		
		83	0.7 m	β^+	−≈65.4 s		
		84	5 m	EC+β^+	−71.44 s	0+	
		85	7.9 m	β^++EC	−73.16 s		
		85	1.4 h?	[β^++EC]			
		85m	10.9 s	IT,β^++EC	−72.87 s		
		86	16.5 h	EC	−77.94 s	0+	
		87	1.6 h	β^+,EC	−79.43	(9/2+)	
		87m	14 s	IT	−79.09	(1/2−)	
		88	83.4 d	EC	−83.621	0+	
		89	78.4 h	EC 77.7%,β^+ 22.3%	−84.860	9/2+	
		89m	4.18 m	IT 93.8%, EC 4.7%,β^+ 1.5%	−84.272	1/2−	
		90	*51.5%*		−88.765	0+	0.03^{m}
		90m	809 ms	IT	−86.446	5−	
		91	*11.2%*		−87.892	5/2+	1.1^{m}
		92	*17.1%*		−88.456	0+	0.2^{m}
		93	1.5×10^6 y	β^-	−87.117	5/2+	1^{m}
		94	*17.4%*		−87.264	0+	0.06
		95	64.0 d	β^-	−85.663	5/2+	
		96	*2.80%*		−85.445	0+	0.020
		97	16.9 h	β^-	−82.954	1/2+	
		98	31 s	β^-,no γ	−81.292	0+	
		99	2.1 s	β^-	−77.89	(1/2+)	
		100	7.1 s	β^-	−76.60	0+	
		101	2.0 s	β^-	−73.05 s		
		102	2.9 s	β^-	−72.36 s	0+	
41	Nb	86	1.4 m	β^+	−69.34 s		
		87	2.6 m	β^++EC	−74.43 s	(9/2+)	
		87	3.9 m	β^++EC	−74.43 s	(1/2−)	
		88	7.8 m	β^++EC	−76.42 s	(4−)	
		88	14.3 m	β^++EC	−76.42 s	(8+)	
		89	2.0 h	β^++EC	−80.621	(9/2+)	
		89	66 m	EC 74%,β^+ 26%	−80.621	(1/2)−	
		90	14.6 h	β^+ 53%,EC 47%	−82.654	8+	
		90m	18.8 s	IT	−82.529	4−	
		91	long	[EC]	−86.637	9/2+	
		91m	62 d	IT 96.6%,EC 3.4%	−86.532	1/2−	
		92	*≈2×10⁻¹¹%* 3.2×10^7 y	EC	−86.448	7+	
		92m	10.15 d	EC 99.94%,β^+ 0.06%	−86.313	2+	
		93	*100%*		−87.209	9/2+	1.1_{g+m}
		93m	13.6 y	IT	−87.179	1/2−	

Nuclide Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
41	Nb	94	2.0×10^4 y	β^-	−86.367	6+	15^{rc}_{g}
							0.59^{rs}_{m}
		94m	6.26 m	IT 99.5%, β^- 0.5%	−86.326	3+	
		95	35.0 d	β^-	−86.786	9/2+	$<7^{rs}$
		95m	87 h	IT 97.5%, β^- 2.5%	−86.552	1/2−	
		96	23.4 h	β^-	−85.608	(6)+	
		97	72 m	β^-	−85.612	9/2+	
		97m	1.0 m	IT	−84.868	1/2−	
		98	2.9 s	β^-	−83.530	1+	
		98m	51 m	β^-	−83.446	(5+)	
		99	15.0 s	β^-	−82.346	(9/2)+	
		99m	2.6 m	β^-, IT?(weak)	−81.981	(1/2)−	
		100	1.5 s	β^-	−79.96		
		100	3.1 s	β^-			
		101	7.0 s	β^-	−78.95		
		101	1.0 m?	β^-			
		102	4.3 s	β^-	−76.36 s		
		102	1.3 s	β^-	−76.36 s		
		103	1.5 s	β^-	−75.41 s		
		104	0.8 s	β^-	−72.65 s		
		104	4.8 s	β^-			
		105	2 s	[β^-]	−≈70.14 s		
		106	≈1 s	β^-			
42	Mo	88	27 m?	β^++EC	−72.92 s		
		88	8 m	β^++EC	−72.92 s		
		90	5.67 h	EC 75%, β^+ 25%	−80.167	0+	
		91	15.49 m	β^+ 94.1%, EC 5.9%	−82.199	9/2+	
		91m	65 s	(β^+, EC) 50%, IT 50%	−81.546	1/2−	
		92	*14.8%*		−86.807	0+	0.3^{rs}_{g}
		93	3×10^3 y	EC	−86.803	5/2+	
		93m	6.9 h	IT 99.88%, EC 0.12%	−84.378	21/2+	
		94	*9.3%*		−88.412	0+	
		95	*15.9%*		−87.712	5/2+	14^{rs}
		96	*16.7%*		−88.795	0+	1^{rs}
		97	*9.6%*		−87.544	5/2+	2^{rs}
		98	*24.1%*		−88.115	0+	0.13
		99	66.02 h	β^-	−85.970	1/2+	
		100	*9.6%*		−86.189	0+	0.20
		101	14.6 m	β^-	−83.516	1/2+	
		102	11.0 m	β^-	−83.562	0+	
		103	60 s	β^-	−80.61 s		
		104	1.0 m	β^-	−81.65 s	0+	
		105	36 s	β^-	−77.14 s		
		106	9.5 s	β^-	−≈76.1 s	0+	
		107	≈5 s	β^-			
		108	1.1 s	β^-	−≈70.9 s	0+	
43	Tc	90	50 s	β^+			
		90	7.9 s	β^+	−71.3	(1+)	
		91	3.14 m	β^++EC	−75.98	(9/2+)	
		91	3.3 m	β^++EC		(1/2)−	
		92	4.4 m	β^++EC	−78.936	(8)+	
		93	2.7 h	EC 87%, β^+ 13%	−83.610	9/2+	
		93m	43 m	IT 80%, EC 20%	−83.217	1/2−	
		94	293 m	EC 89%, β^+ 11%	−84.156	7+	
		94m	52 m	β^+ 72%, EC 28%	−84.081	(2)+	
		95	20.0 h	EC	−86.013	9/2+	
		95m	61 d	EC 95.8%, β^+ 0.31%, IT 3.9%	−85.974	1/2−	
		96	4.3 d	EC	−85.821	7+	
		96m	52 m	IT 98%, EC 2%, β^+ ≈0.01%	−85.787	4+	
		97	2.6×10^6 y	EC, no γ	−87.224	9/2+	
		97m	90 d	IT	−87.128	1/2−	
		98	4.2×10^6 y	β^-	−86.434	(6)+	3^{rs}_{m}
		99	2.14×10^5 y	β^-	−87.326	9/2+	19
		99m	6.02 h	IT 99+%, β^- ≥9×10^{-5}%	−87.184	1/2−	
		100	15.8 s	β^-	−86.019	1+	

Nuclide Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	$J\pi$	σ_n(b)
43	Tc	101	14.3 m	β^-	−86.327	9/2+	
		102	5.3 s	β^-	−84.60 s	1+	
		102m	4.4 m	β^- ≈98%,IT ≈2%	−≈84.3 s	(5)	
		103	50 s	β^-	−84.91		
		104	18.1 m	β^-	−83.85	(3)	
		105	7.6 m	β^-	−82.54		
		106	36 s	β^-	−80.03 s		
		107	21.2 s	β^-	−79.51 s		
		108	5.1 s	β^-	−≈75.8 s		
		109	1.4 s	β^-			
		110	0.82 s	β^-	−≈71 s		
44	Ru	92	3.7 m	β^++EC	−≈74.7 s	0+	
		93	60 s	β^++EC	−77.31 s	(9/2)+	
		93m	10.8 s	β^++EC 79%,IT 21%	−76.58 s	(1/2)−	
		94	52 m	EC	−82.571	0+	
		95	1.65 h	EC 85%,β^+ 15%	−83.452	5/2+	
		96	*5.5%*		−86.075	0+	0.25
		97	2.88 d	EC	−86.07	5/2+	
		98	*1.86%*		−88.226	0+	$<8^{rs}$
		99	*12.7%*		−87.620	5/2+	4
		100	*12.6%*		−89.222	0+	6
		101	*17.0%*		−87.952	5/2+	5
		102	*31.6%*		−89.100	0+	1.3
		103	39.4 d	β^-	−87.261	5/2+	
		104	*18.7%*		−88.099	0+	0.47
		105	4.44 h	β^-	−85.938	(3/2+)	0.30
		106	367 d	β^-,no γ	−86.333	0+	0.12
		107	4.2 m	β^-	−83.71		
		108	4.5 m	β^-	−83.82	0+	
		109	34 s	β^-	−80.81 s		
		109	13 s	β^-	−80.81 s		
		110	16 s	β^-	−≈80.3 s	0+	
		111	1.5 s	β^-			
		111	≈1 m?	[β^-]			
		112	0.7 s?	[β^-]		0+	
45	Rh	94	25 s	β^+			
		94	80 s	β^+			
		95	5.0 m	β^++EC	−78.34	(9/2)+	
		95m	1.96 m	IT 88%,β^++EC 12%	−77.80	(1/2)−	
		96	9.9 m	β^++EC	−79.633	(5+)	
		96m	1.51 m	IT 60%,β^++EC 40%	−79.581	(2+)	
		97	31 m	β^+,EC	−82.56	(9/2)+	
		97m	44 m	(β^+,EC) 95%,IT 5%	−82.30	(1/2)−	
		97	1 m?	?			
		98(g)	8.7 m	β^+,EC	−83.168	(2+)	
		98(m)	3.5 m	β^++EC	−83.162	(5+)	
		99	15.0 d	EC 97.4%,β^+ 2.6%	−85.517	(1/2−)	
		99m	4.7 h	EC ≈90%,β^+ ≈10%	−85.452	9/2+	
		100	20.8 h	EC 95%,β^+ 5%	−85.592	1−	
		100m	4.7 m	IT 93%,EC+β^+ 7%	−85.252	(5+)	
		101	3.3 y	EC	−87.410	1/2−	
		101m	4.34 d	EC 92.8%,IT 7.2%	−87.253	9/2+	
		102	2.9 y	EC		(6+)	
		102m	206 d	EC 62%,β^+ 14%, β^- 19%,IT 5%	−86.777	(2−)	
		103	*100%*		−88.024	1/2−	134_g 11_m
		103m	56.1 m	IT	−87.984	7/2+	
		104	42.3 s	β^- 99.6%,EC 0.4%	−86.952	1+	40^{rs}_{g+m}
		104m	4.34 m	IT 99.87%,β^- 0.13%	−86.823	5+	800^{rs}_{g+m}
		105	35.4 h	β^-	−87.855	(7/2)+	$1.1\times10^4{}_g$ $5\times10^3{}_m$
		105m	45 s	IT	−87.725	1/2−	
		106	29.8 s	β^-	−86.372	1+	
		106m	130 m	β^-	−86.235	4,5,6+	
		107	21.7 m	β^-	−86.86	(5/2)+	
		108	16.8 s	β^-	−85.02	1+	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
45	Rh	108	6.0 m	β^-	−85.09		
		109	80 s	β^-	−85.11 s	(5/2,3/2)+	
		110	3 s	β^-	−82.8		
		110	28 s	β^-	−82.93		
		111	11 s	[β^-]	−82.53 s		
		112	4.6 s	β^-	−80.3 s		
		113	0.9 s	[β^-]			
		114	1.7 s?	β^-			
46	Pd	97	3.3 m	β^++EC	−77.76 s		
		98	18 m	EC+β^+	−81.27 s	0+	
		99	21.4 m	β^+,EC	−86.112	(5/2+)	
		100	3.6 d	EC	−85.230	0+	
		101	8.5 h	EC 93.6%,β^+ 6 4%	−85.428	(5/2)+	
		102	*1.0%*		−87.925	0+	5^{rs}
		103	17.0 d	EC	−87.478	5/2+	
		104	*11.0%*		−89.400	0+	
		105	*22.2%*		−88.422	5/2+	
		106	*27.3%*		−89.913	0+	$0\ 28_g$ $0\ 013_m$
		107	6.5×10^6 y	β^-,no γ	−88 371	5/2+	
		107m	21.3 s	IT	−88.156	11/2−	
		108	*26.7%*		−89.523	0+	11^{rs}_g 0.19^{rs}_m
		109	13.43 h	β^-	−87.606	5/2+	
		109m	4.69 m	IT	−87.417	11/2−	
		110	*11.8%*		−88.335	0+	0.36^{rs}_g 0.02^{rs}_m
		111	22 m	β^-	−86.03	(5/2+)	
		111m	5.5 h	IT 71%,β^- 29%	−85.86	(11/2−)	
		112	21.1 h	β^-	−86.326	0+	
		113	1.5 m	β^-,no γ	−83.64 s		
		114	2.4 m	β^-,no γ	−83.76 s	0+	
		115	37 s	β^-			
		116	14 s	β^-	−≈80.12 s	0+	
		117	5 s	[β^-]			
		118	3.1 s	β^-	−76.21 s	0+	
47	Ag	99	1.8 m?	β^++EC	−76.51 s		
		100	2.3 m	β^++EC	−77.93		
		100	8 m?	β^++EC			
		101	10.8 m	β^++EC	−81.33 s	(9/2+)	
		102	13.0 m	β^+ ≈68%,EC ≈32%	−82.33	5+	
		102m	7.7 m	(β^+,EC) 51%,IT 49%	−82.32	2+	
		103	1.10 h	EC ≈58%,β^+ ≈42%	−84.80	7/2+	
		103m	5.7 s	IT	−84.67	(1/2)−	
		104	69 m	β^+,EC	−85.150	5+	
		104m	33 m	(β^+,EC) 67%,IT 33%		. 2+	
		105	41.3 d	EC 99+%,β^+ 9×10^{-4}%	−87.075	1/2−	
		105m	7.2 m	IT 99.7%,EC 0.3%	−87.049	(7/2)+	
		106	24.0 m	(EC,β^+) ≥99%, β^-? ≤1%	−86.929	1+	
		106m	8.5 d	EC	−86.841	6+	
		107	*51.83%*		−88.404	1/2−	37_g 0.3^{ac}_m
		107m	44.3 s	IT	−88.311	7/2+	
		108	2.4 m	β^- 97.7%,EC 2.1%, β^+ 0.24%	−87.602	1+	
		108m	127 y	EC+β^+ 91%,IT 9%	−87.492	6+	
		109	*48.17%*		−88.722	1/2−	88_g 4_m
		109m	39.8 s	IT	−88.634	7/2+	
		110	24.4 s	β^- 99.7%,EC 0.3%	−87.456	1+	
		110m	252 d	β^- 98.5%,IT 1.5%	−87.338	6+	80_{g+m}
		111	7.45 d	β^-	−88.226	1/2−	3^{rs}
		111m	65 s	IT 99.7%,β^- 0.3%	−88.166	(7/2+)	
		112	3.14 h	β^-	−86.620	2(−)	

Nuclide Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
47	Ag	113	1.15 m	β^-	−86.82		
		113	5.37 h	β^-	−87.040	1/2(−)	
		114	4.5 s	β^-	−85.16	1+	
		115	18 s	β^-			
		115	20 m	β^-	−84.91	(1/2−)	
		116	2.68 m	β^-	−82.62 s		
		116m	10.5 s	β^- ≈98%,IT ≈2%	−82.54 s		
		117	1.21 m	β^-	−82.24		
		117	5.3 s	β^-	−82.24		
		118	3.7 s	β^-	−80.21 s		
		118m	2.8 s	β^- 59%,IT 41%	−80.08 s		
		119	2.1 s	β^-	−79.31 s	(7/2+)	
		120	1.2 s	β^-	−≈78.0 s	(3+)	
		120m	0.32 s	β^- ≈63%,IT ≈37%	−≈77.8 s	(6−)	
		121	≲3 s	[β^-]			
		122	1.5 s	[β^-]	−≈70.5 s		
		123	0.39 s	[β^-],β^-n			
48	Cd	100	1.1 m	β^++EC	−73.43 s	0+	
		101	1.2 m	β^++EC	−75.53 s		
		102	5.5 m	EC,β^+	−79.43 s	0+	
		103	7.3 m	β^+,EC	−80.60		
		104	58 m	EC 99.2%,β^+ 0.8%	−83.57	0+	
		105	56.0 m	EC,β^+	−84.336	5/2+	
		106	*1.25%*		−87.131	0+	1^{rs}
		107	6.50 h	EC 99.77%,β^+ 0.23%	−86.987	5/2+	
		108	*0.89%*		−89.251	0+	1.2^{rs}
		109	453 d	EC	−88.540	5/2+	700^{rs}
		110	*12.5%*		−90.349	0+	11^{rs}_{g} 0.10^{rs}_{m}
		111	*12.8%*		−89.254	1/2+	24^{rs}
		111m	48.6 m	IT	−88.858	11/2−	
		112	*24.1%*		−90.578	0+	2^{rs}_{g}
		113	*12.2%* 9×10^{15} y	β^-,no γ	−89.050	1/2+	1.98×10^{4}
		113m	14 y	β^- 99.9%,IT 0.1%	−88.787	11/2−	
		114	*28.7%*		−90.020	0+	0.30^{sc}_{g} 0.04^{sc}_{m}
		115	53.4 h	β^-	−88.093	1/2+	
		115m	44.8 d	β^-	−87.920	11/2−	
		116	*7.5%*		−88.718	0+	0.05^{sc}_{g} 0.025^{sc}_{m}
		117	2.4 h	β^-	−86.416	1/2+	
		117m	3.4 h	β^-	−86.29	11/2−	
		118	50.3 m	β^-,no γ	−86.707	0+	
		119	2.7 m	β^-	−84.23	1/2+	
		119m	1.9 m	β^-	−84.08	11/2−	
		120	50.8 s	β^-	−83.981	0+	
		121	12.8 s	β^-	−≈81.3 s		
		121	4.8 s	β^-	−≈81.3 s		
		122	5.8 s	β^-	−≈80.0 s	0+	
		124	0.9 s	β^-	−≈76.4 s	0+	
49	In	104	1.5 m	β^++EC	−75.57 s		
		105	5.1 m	β^++EC	−79.34 s		
		105m	55 s?	IT?			
		106	5.3 m	β^++EC	−80.586	(3)	
		106	6.3 m	β^++EC			
		107	32.4 m	EC 65%,β^+ 35%	−83.50	9/2+	
		107m	50 s	IT	−82.82	1/2−	
		108	40 m	EC,β^+	−84.10	3+	
		108	58 m	EC,β^+	−84.13	(5,6+)	
		109	4.2 h	EC 94%,β^+ 6%	−86.524	9/2+	
		$109m_1$	1.3 m	IT	−85.874	1/2−	
		$109m_2$	0.21 s	IT	−84.41	(19/2+)	
		110	4.9 h	EC		7+	
		110	69 m	β^+,EC	−86.409	2+	
		111	2.83 d	EC	−88.405	9/2+	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
49	In	111m	7.6 m	IT	−87.869	1/2−	
		112	14.4 m	β^- 44%,EC 34%, β^+ 22%	−88.000	1+	
		112m	20.9 m	IT	−87.845	4+	
		113	*4.3%*		−89.372	9/2+	5_m
		113m	99.5 m	IT	−88.980	1/2−	3_g
		114	71.9 s	β^- 98.1%,EC 1.9%, β^+ 0.004%	−88.576	1+	
		114m	49.51 d	IT 96.7%,EC 3.3%	−88.386	5+	
		115	*95.7%* 5.1×10^{14} y	β^-,no γ	−89.541	9/2+	91_{m2} 70_{m1} 41_g
		115m	4.49 h	IT 95%,β^- 5%	−89.205	1/2−	
		116	14.10 s	β^-	−88.253	1+	
		$116m_1$	54.1 m	β^-	−88.126	5+	
		$116m_2$	2.16 s	IT	−87.963	8−	
		117	42 m	β^-	−88.944	9/2+	
		117m	1.93 h	β^- 53%,IT 47%	−88.629	1/2−	
		118	5.0 s	β^-	−87.45	1+	
		118	4.4 m	β^-	−87.37	(5)+	
		118	8.5 s	IT 98.5%,β^- 1.5%	−87.23	(8)−	
		119	2.1 m	β^-	−87.730	9/2+	
		119m	18.0 m	β^- 95%,IT 5%	−87.419	1/2−	
		120	44 s	β^-	−85.8	(5)+	
		120	3.0 s	β^-	−85.5	1+	
		121	30.0 s	β^-	−85.842	9/2+	
		121m	3.8 m	β^- 98.8%,IT 1.2%	−85.528	1/2−	
		122	9.2 s	β^-	−83.4		
		122	1.5 s	β^-	−83.5	(1+)	
		123(g)	6.0 s	β^-	−83.44	(9/2)+	
		123(m)	46 s	β^-	−83.12	(1/2)−	
		124	2.4 s	β^-			
		124	3.2 s	β^-	−81.10	(2+)	
		125	2.32 s	β^-	−80.50	(9/2)+	
		125	12.2 s	β^-			
		126	1.53 s	β^-	−77.90		
		127	1.3 s	β^-	−77.36		
		127	3.7 s	β^-,β^-n	−77.36		
		128	12 s?	[β^-],β^-n			
		129	2.5 s	β^-,β^-n			
		129	0.99 s	β^-,β^-n	−73.12		
		130	0.58 s	β^-,β^-n	−70.08 s		
		131	0.29 s	β^-,β^-n	−69.8 s	(9/2+)	
		132	0.12 s	β^-,β^-n	−≈65 s		
50	Sn	106	1.9 m	EC+β^+	−76.99 s	0+	
		107	2.90 m	β^++EC	−78.40 s		
		108	10.5 m	EC	−81.90 s	0+	
		109	18.0 m	β^+,EC	−82.62 s	7/2+	
		109	1.5 m?	?			
		110	4.1 h	EC	−85.834	0+	
		111	35 m	EC 71%,β^+ 29%	−85.941	7/2+	
		112	*1.01%*		−88.658	0+	0.4_g^{rs} 0.3_m^{rs}
		113	115.1 d	EC	−88.332	1/2+	
		113m	21 m	IT 91%,EC 9%	−88.253	7/2+	
		114	*0.67%*		−90.560	0+	
		115	*0.38%*		−90.035	1/2+	50^{rs}
		116	*14.6%*		−91.526	0+	0.006_m^{rs}
		117	*7.75%*		−90.399	1/2+	3^{rs}
		117m	14.0 d	IT	−90.084	11/2−	
		118	*24.3%*		−91.654	0+	0.08_m^{rs}
		119	*8.6%*		−90.067	1/2+	2
		119m	≈250 d	IT	−89.977	11/2−	
		120	*32.4%*		−91.102	0+	0.16_g 0.001_m

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
50	Sn	121	27.1 h	β^-,no γ	−89.202	3/2+	
		121m	55 y	β^-	−89.196	(11/2)−	
		122	*4.56%*		−89.946	0+	0.15_m 0.001_g
		123	129 d	β^-	−87.821	11/2−	
		123m	40.1 m	β^-	−87.796	(3/2)+	
		124	*5.64%*		−88.240	0+	0.13_m 0.005_g
		125	9.62 d	β^-	−85.903	11/2−	
		125m	9.5 m	β^-	−85.876	3/2+	
		126	≈1×10^5 y	β^-	−86.024	0+	
		127	2.1 h	β^-	−83.79	(11/2−)	
		127m	4.1 m	β^-	−83.78	(3/2)+	
		128	59.3 m	β^-	−83.44	0+	
		129	2.2 m	β^-	−80.64	(3/2+)	
		129m	7.5 m	β^-	−80.60	(11/2−)	
		130	3.7 m	β^-	−80.38	0+	
		130m	1.7 m	β^-		(7−)	
		131	63 s	β^-	−77.48 s	(3/2+)	
		132	40 s	β^-	−76.60	0+	
		133	1.47 s	β^-,β^-n	−71.5		
		134	1.04 s	β^-,β^-n ≈17%		0+	
51	Sb	108	7.0 s	β^+	−72.40 s	(3+)	
		109	18.3 s	β^++EC	−76.12 s		
		110	23 s	β^+ ≈92%,EC ≈8%	−76.75	(3)+	
		111	75 s	β^+,EC	−81.47	(5/2)+	
		112	54 s	β^+,EC	−81.63	(3+)	
		113	6.7 m	EC,β^+	−84.443	(5/2)+	
		114	3.5 m	β^+,EC	−84.14	(3)+	
		114	8 m	?			
		115	31.8 m	EC 67%,β^+ 33%	−87.005	5/2+	
		116	16 m	EC 72%,β^+ 28%	−86.93	3+	
		116m	60.4 m	EC 81%,β^+ 19%	−86.32	8−	
		117	2.80 h	EC 97.5%,β^+ 2.5%	−88.654	5/2+	
		118	3.5 m	EC,β^+	−87.967	1+	
		118	0.87 s	?			
		118m	5.00 h	EC 99.84%,β^+ 0.16%	−87.747	8−	
		119	38.0 h	EC	−89.483	5/2+	
		120	15.8 m	EC 56%,β^+ 44%	−88.421	1+	
		120	5.76 d	EC		8−	
		121	*57.3%*		−89.588	5/2+	6.1_g 0.06_m
		122	2.68 d	β^- 97.0%,EC 3.0%, β^+ 0.0063%	−88.323	2−	
		122m	4.2 m	IT	−88.160	(8−)	
		123	*42.7%*		−89.218	7/2+	4.0_g 0.04_{m1}
		124	60.20 d	β^-	−87.613	3−	7^m
		124m_1	93 s	IT 80%,β^- 20%	−87.603	(5)+	
		124m_2	20.2 m	IT	−87.578		
		125	2.7 y	β^-	−88.252	7/2+	
		126	12.4 d	β^-	−86.402	(8−)	
		126m	19.0 m	β^- 86%,IT 14%	−86.384	(5)+	
		127	3.9 d	β^-	−86.704	7/2+	
		128(g)	9.1 h	β^-	−≈84.75	8−	
		128(m)	10.0 m	β^- 96.4%,IT 3.6%	−84.73	5+	
		129	4.4 h	β^-	−84.630	7/2+	
		130	40 m	β^-	−82.38	(8−)	
		130	6.5 m	β^-		(4,5)+	
		131	23.03 m	β^-	−82.10 s	(7/2+)	
		132	2.8 m	β^-	−79.68	(4+)	
		132	4.2 m	β^-		(8−)	
		133	2.7 m	β^-	−78.98		
		134	10.4 s	β^-,β^-n 0.09%	−73.87 s		
		134	0.8 s	β^-,no γ	−73.87 s		
		135	1.70 s	β^-,β^-n 20%	−70.44 s	(7/2+)	
		136	0.82 s	β^-,β^-n 32%			
52	Te	107	2.1 s	α			

Z	Nuclide El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_γ(b)
52	Te	108	5.3 s	α,[β^++EC],(β^++EC)p	−65.32 s	0+	
		109	4.2 s	[β^++EC],(β^++EC)p,α	−67.47 s		
		111	19 s	β^++EC,(β^++EC)p	−74.10 s		
		113	2.0 m	β^++EC	−78.96		
		114	17 m	EC+β^+	−81.46 s	0+	
		116	6.0 m	β^+ ≈75%,EC ≈25%	−82.58	(7/2+)	
		115	7.5 m	β^++EC		(1/2+)	
		116	2.50 h	EC,β^+	−85.37	0+	
		117	62 m	EC 70%,β^+ 30%	−85.164	1/2+	
		118	6.00 d	EC,no γ	−87.671	0+	
		119	16.05 h	EC 97.2%,β^+ 2.8%	−87.189	1/2+	
		119m	4.68 d	EC	−≈86.89	11/2−	
		120	*0.091%*		−89.404	0+	2.0_g^{rs} 0.3_m^{rs}
		121	16.8 d	EC	−88.486	1/2+	
		121m	154 d	IT 90%,EC 10%, β^+ 0.002%	−88.192	11/2−	
		122	*2.5%*		−90.304	0+	3_{g+m}^{rs}
		123	*0.89%*		−89.166	1/2+	400^{rs}
		123m	119.7 d	IT	−88.918	11/2−	
		124	*4.6%*		−90.518	0+	7_g^{rs} 0.05_m^{rs}
		125	*7.0%*		−89.019	1/2+	1.6^{rs}
		125m	58 d	IT	−88.874	11/2−	
		126	*18.7%*		−90.066	0+	0.9_g^{rs} 0.13_m^{rs}
		127	9.4 h	β^-	−88.285	3/2+	
		127m	109 d	IT 97.6%,β^- 2.4%	−88.197	11/2−	
		128	*31.7%* $1.5\times1C^{24}$ y	$\beta^-\beta^-$	−88.992	0+	0.20_g 0.016_m
		129	69 m	β^-	−87.007	3/2+	
		129m	33.5 d	IT 63%,β^- 37%	−86.901	11/2−	
		130	*34.5%* 2×10^{21} y	$\beta^-\beta^-$	−87.348	0+	$0\ 2_g^{rs}$ 0.03_m^{rs}
		131	25.0 m	β^-	−85.201	3/2+	
		131m	30 h	β^- 78%,IT 22%	−85.019	11/2−	
		132	78 h	β^-	−85.213	0+	
		133	12.4 m	β^-	−82.93	(3/2+)	
		133m	55.4 m	β^- 83%,IT 17%	−82.60	(11/2−)	
		134	42 m	β^-	−82.67 s	0+	
		135	19.2 s	β^-	−77.60		
		136	17.5 s	β^-,β^-n 0.7%	−74.83 s	0+	
		137	4 s	β^-,β^-n 2.5%			
		138	1.4 s	β^-,β^-n 6%		0+	
53	I	115	1.3 m	β^++EC	−76.78 s		
		116	2.9 s	β^++EC	−77.61	1+	
		117	2.2 m	EC 54%,β^+ 46%	−80.85		
		118	14.3 m	β^+ 54%,EC 46%	−80.60	(2−)	
		118m	8.5 m	β^+,EC,IT	−80.50		
		119	19.3 m	β^+ 51%,EC 49%	−83.82		
		120	1.35 h	EC 54%,β^+ 46%	−83.789	2−	
		120m	53 m	β^+,EC	−82.86		
		121	2.12 h	EC 94%,β^+ 6%	−86.12	5/2+	
		122	3.6 m	β^+ 77%,EC 23%	−86.16	1+	
		123	13.0 h	EC	−87.97	5/2+	
		124	4.2 d	EC 75%,β^+ 25%	−87.361	2−	
		125	60.2 d	EC	−88.841	5/2+	900^{rs}
		126	13.0 d	EC 53%,β^+ 1.0%, β^- 46%	−87.911	2−	$6\times10^{3\,rs}$
		127	*100%*		−88.980	5/2+	6.1
		128	24.99 m	β^- 94%,EC 6%, β^+ 0.003%	−87.734	1+	
		129	1.6×10^7 y	β^-	−88.505	7/2+	18_m 9_g

Nuclide Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
53	I	130	12.36 h	β^-	−86.897	5+	18^{rs}
		130m	9.2 m	IT 83%,β^- 17%	−86.849	2+	
		131	8.040 d	β^-	−87.451	7/2+	0.7_{g+m}
		132	2.28 h	β^-	−85.706	4+	
		132m	83 m	IT 86%,β^- 14%	−≈85.59	(8−)	
		133	20.9 h	β^-	−85.902	7/2+	
		133m	9 s	IT	−84.268	(19/2−)	
		134	52.6 m	β^-	−83.97	(4)+	
		134m	3.5 m	IT 98%,β^- 2%	−83.65	(8−)	
		135	6.61 h	β^-	−83.796	7/2+	
		136	46 s	β^-		(5,6−)	
		136	83 s	β^-	−79.43	(2−)	
		137	24.5 s	β^-,β^-n 6%	−76.72		
		138	6.5 s	β^-,β^-n 5%	−71.85 s	(2,3−)	
		139	2.3 s	β^-,β^-n 10%	−≈68.8 s		
		140	0.8 s	β^-,β^-n 14%			
		141	0.5 s	[β^-],β^-n ≈60%			
54	Xe	113	2.8 s	[β^++EC],(β^++EC)p	−71.86 s		
		115	18 s	β^+,EC,(β^++EC)p 0.3%	−68.87 s		
		116	57 s	β^++EC	−73.27	0+	
		117	61 s	EC 65%,β^+ 35%, (EC+β^+)p 0.003%	−74.48 s		
		118	6 m	EC 86%,β^+ 14%	−77.30 s	0+	
		119	6 m	EC 82%,β^+ 18%	−78.83		
		120	40 m	EC 97%,β^+ 3%	−81.84	0+	
		121	39 m	EC 92%,β^+ 8%	−82.33		
		122	20.1 h	EC	−85.16 s	0+	
		123	2.08 h	EC 87%,β^+ 13%	−85.29	(1/2+)	
		124	*0.096%*		−87.45	0+	100_{g} 20_{m}
		125	17 h	EC 99.7%,β^+ 0.3%	−87.11	(1/2)+	
		125m	57 s	IT	−86.86	(9/2)−	
		126	*0.090%*		−89.162	0+	3_{g} 0.4_{m}
		127	36.41 d	EC	−88.316	(1/2+)	
		127m	69 s	IT	−88.019	(9/2−)	
		128	*1.92%*		−89.861	0+	0.4_{m} $<8^{rs}_{a}$
		129	*26.4%*		−88.698	1/2+	20^{rs}
		129m	8.89 d	IT	−88.461	11/2−	
		130	*4.1%*		−89.881	0+	0.4_{m} $<26_{a}$
		131	*21.2%*		−88.421	3/2+	90^{rs}
		131m	11.77 d	IT	−88.257	11/2−	
		132	*26.9%*		−89.286	0+	0.4_{g} 0.03_{m}
		133	5.25 d	β^-	−87.662	3/2+	190^{rs}_{g}
		133m	2.19 d	IT	−87.429	11/2−	
		134	*10.4%*		−88.125	0+	0.25_{g} 0.003_{m}
		134m	0.29 s	IT	−86.160	(7−)	
		135	9.10 h	β^-	−86.506	3/2+	2.6×10^{6}
		135m	15.6 m	IT 99+%,β^- 0.004%	−85.979	11/2−	
		136	*8.9%*		−86.425	0+	0.16
		137	3.82 m	β^-	−82.215	(7/2)−	
		138	14.1 m	β^-	−80.15	0+	
		139	39.7 s	β^-	−75.75	(7/2−)	
		140	14 s	β^-	−73.18	0+	
		141	1.73 s	β^-,β^-n 0.05%	−69.00		
		142	1.2 s	β^-,β^-n 0.41%	−66.05	0+	
		143	0.30 s	β^-			
		143	0.96 s	β^-			
		144	1.2 s	β^-		0+	
		146	0.9 s	β^-			
55	Cs	118	3.9 s	β^++EC,(β^++EC)p 0.3%	−62.63 s		

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
55	Cs	117	8 s	β^++EC	−66.85 s		
		118	16 s	β^++EC, (β^++EC)p 0.04%, (β^++EC)α 0.0024%	−67.89 s		
		119	38 s	β^++EC	−72.53 s		
		120	60 s	β^++EC, (β^++EC)α 2.0×10^{-5}%, (β^++EC)p 7×10^{-6}%	−73 4		
		121	126 s	β^+,EC	−77.13 s		
		122	4.5 m	β^++EC			
		122	21 s	β^++EC	−78.01 s	(2,3+)	
		122	0.4 s	?			
		123	5.9 m	β^+,EC	−81.19	(1/2+)	
		123m	1.6 s	IT			
		124	31 s	β^+ ≈92%,EC ≈8%	−81.53	(1+)	
		125	45 m	EC 61%,β^+ 39%	−84.04	1/2+	
		126	1.64 m	β^+ 82%,EC 18%	−84.33	1+	
		127	6.2 h	EC 96.5%,β^+ 3.5%	−86.226	1/2+	
		128	3.6 m	β^+ 61%,EC 39%	−85.935	1+	
		129	32.3 h	EC 99+%,β^+ 0.0030%	−87.493	1/2+	
		130	29.9 m	(EC,β^+) 98.4%, β^- 1.6%	−86.863	1+	
		131	9.688 d	EC,no γ	−88.066	5/2+	
		132	6.47 d	EC 96.5%,β^+ 1.5%, β^- 2.0%	−87.175	2(−)	
		133	*100%*		−88.089	7/2+	27_g 2.5_m
		134	2.062 y	β^- 99+%,EC 3×10^{-4}%	−86.909	4+	140^{rs}_g
		134m	2.90 h	IT	−86.770	8−	
		135	3×10^6 y	β^-,no γ	−87.665	7/2+	9^{sc}
		135m	53 m	IT	−86.038	(19/2−)	
		136	13.1 d	β^-	−86 358	5+	
		136m	19 s	IT			
		137	30.17 y	β^-	−86.560	7/2+	0.11^{rs}_{g+m}
		138	32.2 m	β^-	−82.98	3−	
		138m	2.9 m	IT 75%,β^- 25%	−82.90	(6−)	
		139	9.5 m	β^-	−80.63	(7/2+)	
		140	65 s	β^-	−77.24	1,2−	
		141	24.9 s	β^-,β^-n 0.05%	−75.00		
		142	1.69 s	β^-,β^-n 0.28%	−70.95		
		143	1.78 s	β^-,β^-n 1.7%	−68.36 s		
		144	1.00 s	β^-,β^-n 3.0%	−63.93 s		
		145	0.58 s	β^-,β^-n 12%	−61.72 s		
		146	0.34 s	β^-,β^-n 14%			
56	Ba	117	1.9 s	[β^++EC],(β^++EC)p			
		119	5.3 s	(β^++EC)p	−64.53 s		
		120	32 s	β^++EC	−68.8 s	0+	
		121	30 s	β^++EC, (β^++EC)p 0.02%	−70.55 s		
		122	2.0 m	β^++EC	−74.26 s	0+	
		122	≈4 s	[β^++EC]			
		123	2.7 m	β^++EC	−75.69 s		
		124	11 m	EC+β^+	−78.75 s	0+	
		126	3.5 m	β^+,EC	−79.53		
		125	8 m	β^++EC			
		126	100 m	EC+β^+	−82.56 s	0+	
		127	13 m	β^+ ≈51%,EC ≈49%	−82.78	(1/2+)	
		127	18 m	β^++EC			
		128	2.43 d	EC	−85.482	0+	
		129	2.2 h	EC,β^+	−85.046	1/2+	
		129m	2.1 h	EC+β^+	−84.769	(11/2)−	
		130	*0.106%*		−87.303	0+	8^{rs}_g 2.5^{rs}_m
		131	12.0 d	EC	−86.726	1/2+	
		131m	14.6 m	IT	−86.538	9/2−	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
56	Ba	132	*0.101%*		−88.453	0+	7_g^{rs} 0.6_m^{rs}
		133	10.7 y	EC	−87.569	1/2+	
		133m	38.9 h	IT 99+%,EC 0.011%	−87.281	11/2−	
		134	*2.42%*		−88.968	0+	0.16_m^{rs} $\approx 2_o$
		135	*6.59%*		−87.870	3/2+	6_g^{rs} 0.014_m^{rs}
		135m	28.7 h	IT	−87.602	11/2−	
		136	*7.85%*		−88.906	0+	0.011_m^{rs} 0.4_o
		136m	0.31 s	IT	−86.876	7−	
		137	*11.2%*		−87.733	3/2+	5.1^{rs}
		137m	2.551 m	IT	−87.071	11/2−	
		138	*71.7%*		−88.273	0+	0.4^{rs}
		139	82.9 m	β^-	−84.925	(7/2)−	6^{rs}
		140	12.79 d	β^-	−83.285	0+	1.6
		141	18.2 m	β^-	−79.98		
		142	10.6 m	β^-	−77.82	0+	
		143	13.5 s	β^-	−74.01 s		
		144	11.9 s	β^-	−72.03 s	0+	
		145	5 s	β^-	−67.82 s		
		146	1.7 s	β^-	−65.56 s	0+	
		148	0.5 s	β^-		0+	
57	La	125	<1 m?	?			
		126	1.0 m	β^++EC			
		127	3.8 m	β^++EC	−77.78 s		
		128	4.6 m	β^++EC	−78.68 s		
		129	10 m	β^++EC	−81.05 s	(3/2+)	
		129m	0.56 s	IT	−80.88 s	(11/2−)	
		130	8.7 m	β^+,EC	−81.60 s	(3+)	
		131	61 m	EC 76%,β^+ 24%	−83.77	3/2+	
		132	4.8 h	β^+,EC	−83.74	2−	
		132m	24.3 m	IT 76%,EC+β^+ 24%	−83.55	6−	
		133	3.91 h	EC,β^+	−85.57 s	5/2+	
		134	6.67 m	β^+ 62%,EC 38%	−85.268	1+	
		135	19.4 h	EC 99+%,β^+ 0.009%	−86.670	5/2+	
		136	9.87 m	EC 64%,β^+ 36%	−86.04	1+	
		137	6×10^4 y	EC,no γ	−87.13 s	7/2+	
		138	*0.089%* 1.1×10^{11} y	EC 68%,β^- 32%	−86.524	5+	57
		139	*99.911%*		−87.231	7/2+	9.2
		140	40.3 h	β^-	−84.320	3−	2.7^{rc}
		141	3.90 h	β^-	−83.008		
		142	93 m	β^-	−80.018	2−	
		143	14.0 m	β^-	−78.31		
		144	40 s	β^-	−74.93 s		
		145	30 s	β^-	−72.92 s		
		146	11 s	β^-	−69.46 s		
		148	1.3 s	β^-	−63.99 s		
58	Ce	128	≈6 m	[EC+β^+]		0+	
		129	3.5 m	β^++EC			
		130	25 m	EC+β^+		0+	
		131	5 m	EC+β^+	−79.47 s		
		131	10 m	EC 89%,β^+ 11%	−79.47 s		
		132	3.5 h	EC	−82.34 s	0+	
		133	97 m	EC+β^+	−82.17 s	1/2(+)	
		133	5.4 h	EC,β^+	−82.17 s	9/2−	
		134	76 h	EC	−84.77 s	0+	
		135	17.8 h	EC 99%,β^+ 1%	−84.55	1/2(+)	
		136m	20 s	IT	−84.10	(11/2−)	
		136	*0.190%*		−86.50	0+	6_g^{rs} 1.0_m^{rs}
		137	9.0 h	EC 99+%,β^+ 0.014%	−85.91 s	3/2+	

Nuclide Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
58	Ce	137m	34.4 h	IT 99.2%,EC 0.8%	−85.66 s	11/2−	
		138	*0.254%*		−87.565	0+	1.0$^{rs}_{g}$ 0.015$^{rs}_{m}$
		139	137.2 d	EC	−86.966	3/2+	
		139m	56 s	IT	−86.212	11/2−	
		140	*88.5%*		−88.081	0+	0.56^{rs}
		141	32.5 d	β^-	−85.438	7/2−	29^{rs}
		142	*11.1%*		−84.535	0+	0.95
		143	33.0 h	β^-	−81.610	3/2−	6^{rs}
		144	284 d	β^-	−80.431	0+	1 0
		145	3.0 m	β^-	−77.12		
		146	14 m	β^-	−75.76	0+	
		147	56 s	β^-	−72.24 s		
		148	48 s	β^-	−70.81 s	0+	
		149	5.0 s	β^-	−67.47 s		
		150	4 s	β^-	−65.3 s	0+	
		151	1.0 s	β^-	−62.68 s		
59	Pr	121	1 s	[β^++EC],(β^++EC)p			
		129	24 s	β^++EC			
		130	28 s	β^+,EC			
		132	1.6 m	β^++EC	−75.34 s		
		133	6.5 m	β^+,EC.	−77.97 s	5/2(+)	
		134	17 m	β^++EC	−78.47 s	2+	
		134	≈11 m	β^++EC	−78.47 s		
		135	25 m	EC ≈75%,β^+ ≈25%	−80.99	3/2(+)	
		136	13.1 m	β^+,EC	−81.40	2+	
		137	1.28 h	EC 75%,β^+ 25%	−83.21 s	5/2+	
		138	1.4 m	β^+,EC	−83.128	1+	
		138m	2.1 h	EC 77%,β^+ 23%	−82.765	7−	
		139	4.4 h	EC 92%,β^+ 8%	−84.854	5/2+	
		139	≈6 m?	?			
		140	3.39 m	EC 51%,β^+ 49%	−84.693	1+	
		141	*100%*		−86.018	5/2+	8$_{g}$ 3.9$_{m}$
		142	19.2 h	β^- 99+%,EC 0.015%	−83.790	2−	20^{rs}
		142m	14.6 m	IT	−83.786	5−	
		142	1.6 m?	?			
		143	13.58 d	β^-	−83.065	7/2+	90$_{g+m}$
		144	17.3 m	β^-	−80.750	0−	
		144m	7.2 m	IT 99.96%,β^- 0.04%	−80.691	3−	
		145	5.98 h	β^-	−79.625	(7/2+)	
		146	24.0 m	β^-	−76.84	(1,2−)	
		147	13 m	β^-	−75.44		
		148	2.30 m	β^-	−72.61	(3)	
		149	2.3 m	β^-	−71.37	(5/2+)	
		150	6.2 s	β^-	−68.0		
		150	30 s?	β^-			
		151	4 s	β^-	−67.44 s		
60	Nd	129	6 s	[β^++EC],(β^++EC)p			
		130	28 s	β^+,EC		0+	
		132	1.8 m	β^++EC		0+	
		133	1.2 m	β^++EC			
		134	8 m	EC+β^+		0+	
		135	12 m	β^++EC	−76.29 s	9/2(−)	
		135	5.5 m	[β^++EC]	−76.29 s		
		136	50.6 m	EC 94%,β^+ 6%	−79.19	0+	
		137	38 m	β^+,EC	−79.41 s	1/2+	
		137m	1.6 s	IT	−78.89 s	11/2−	
		137	≈22 m	?			
		138	5.1 h	EC	−82.03 s	0+	
		139	30 m	EC 74.4%,β^+ 25.6%	−82.05	3/2+	
		139m	5.5 h	EC 87%,β^+ ≈1%, IT 12%	−81.82	11/2−	
		140	3.37 d	EC,no γ	−84.22	0+	
		141	2.5 h	EC 97.3%,β^+ 2.7%	−84.203	3/2+	
		141m	61 s	IT 99.97%, EC+β^+ 0.03%	−83.446	11/2−	

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
60	Nd	142	*27.2%*		−85.949	0+	19 ^{rs}
		143	*12.2%*		−84.000	7/2−	320
		144	*23.8%* 2.1×10^{15} y	α	−83.746	0+	4 ^{rs}
		145	*8.3%*		−81.430	7/2−	41
		146	*17.2%*		−80.923	0+	1.3
		147	11.0 d	β^-	−78.144	5/2−	440 ^{rs}
		148	*5.7%*		−77.407	0+	2.5
		149	1.73 h	β^-	−74.374	5/2−	
		150	*5.6%*		−73.682	0+	1.2
		151	12.4 m	β^-	−70.945	(3/2+)	
		152	11.4 m	β^-	−70.146	0+	
		154	40 s	β^-		0+	
61	Pm	132	4 s	β^++FC			
		133	12 s	β^++EC			
		134	24 s	β^++EC			
		135	0.9 m	β^++EC		(11/2−)	
		136	107 s	β^++EC	−71.36 s	(5+)	
		137	2.4 m	β^++EC	−74.21 s	(11/2−)	
		138	3.5 m	β^++EC	−75.03 s	(3+)	
		139	4.15 m	β^+,EC	−77.60	(5/2)+	
		140	9.2 s	β^+,EC	−78.18	1+	
		140m	5.9 m	EC 58%,β^+ 42%	−77.78	(7−)	
		141	20.9 m	β^+ 57%,EC 43%	−80.47	5/2+	
		142	40.5 s	β^+ 69%,EC 31%	−81.06	1+	
		143	265 d	EC	−82.959	5/2+	
		144	349 d	EC	−81.416	5−	
		145	17.7 y	EC 99+%,α 2.8×10^{-7}%	−81.270	5/2+	
		146	5.5 y	EC 63%,β^- 37%	−79.442	3−	8×10^{3} ^{rs}
		147	2.6234 y	β^-	−79.040	7/2+	97 $_{g}$ 85 $_{m}$
		148	5.37 d	β^-	−76.870	1−	<3×10^{3} ^{rs}
		148m	41.3 d	β^- 95%,IT 5%	−76.733	6−	1.06×10^{4}
		149	53.1 h	β^-	−76.063	7/2+	1.4×10^{3} ^{rs}
		150	2.68 h	β^-	−73.55	(1−)	
		151	28.4 h	β^-	−73.386	5/2+	<700 ^{rs}
		152	4.1 m	β^-	−71.29	(1+)	
		152	7.5 m	β^-		(4)	
		152	15 m	β^-		(≥6)	
		153	5.4 m	β^-	−70.76	(5/2−)	
		154	1.7 m	β^-	−68.45	(0,1)	
		154	2.7 m	β^-		(3,4)	
62	Sm	133	32.0 s	β^++EC,(β^++EC)p			
		134	12 s	β^++EC		0+	
		135	10 s	β^++EC,(β^++EC)p			
		137	44 s	β^++EC			
		138	3.0 m	β^++EC		0+	
		139	2.5 m	β^+,EC	−72.40		
		139m	10 s	IT 93.7%,β^++EC 6.3%	−71.94	(11/2)−	
		140	14.8 m	EC,β^+	−75.48 s	0+	
		141	10.2 m	EC 53%,β^+ 47%	−75.91	1/2+	
		141m	22.5 m	(β^+,EC) 99.69%, IT 0.31%	−75.73	11/2−	
		142	72.49 m	EC 90%,β^+ 10%	−78.978	0+	
		143	8.83 m	EC 54%,β^+ 46%	−79.511	3/2+	
		143m	66 s	IT 99.80%, β^++EC 0.20%	−78.757	11/2−	
		144	*3.1%*		−81.964	0+	0.7 ^{rs}
		145	340 d	EC	−80.656	7/2−	110 ^{rs}
		146	*<2×10^{-7}%* 1.03×10^{8} y	α	−80.984	0+	
		147	*15.1%* 1.06×10^{11} y	α	−79.265	7/2−	60
		148	*11.3%* 8×10^{15} y	α	−79.335	0+	4.7
		149	*13.9%*		−77.135	7/2−	4.2×10^{4}
		150	*7.4%*		−77.049	0+	104

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
62	Sm	151	90 y	β^-	−74.574	5/2−	1.5×10^{4} rs
		152	*26.6%*		−74.761	0+	204
		153	46.8 h	β^-	−72.557	3/2+	
		154	*22.6%*		−72.454	0+	5
		155	22.4 m	β^-	−70.196	3/2−	
		156	9.4 h	β^-	−69.368	0+	
		157	8.0 m	β^-	−66.86		
63	Eu	138	1.5 s	β^+			
		138	35 s	β^+			
		139	22 s	β^++EC			
		140	1.3 s	β^+,EC			
		140	≈20 s	β^++EC			
		141	40 s	β^+,EC	−69.88	(5/2+)	
		141m	3.3 s	β^++EC 67%,IT 33%	−69.78	(11/2−)	
		142	2.4 s	β^+,EC	−71.48 s	1+	
		142	1.22 m	β^+,EC	−71.48 s	(7−)	
		143	2.61 m	β^+ ≈72%,EC ≈28%	−74.41	(5/2)+	
		144	10.2 s	β^+ ≈80%,EC ≈20%	−75.636	1+	
		145	5.93 d	EC 98%,β^+ 2%	−77.936	5/2+	
		146	4.62 d	EC 96.1%,β^+ 3.9%	−77.111	4−	
		146	38 h?	?			
		147	22 d	EC 99.5%,β^+ 0.5%, α 0.002%	−77.535	5/2+	
		148	54 d	EC 99.8%,β^+ 0.2%, α 9×10^{-7}%	−76.235	5−	
		149	93.1 d	EC	−76.439	5/2+	
		150	36 y	EC		(4,5−)	
		150	12.6 h	β^- 89%,EC 10.6%, β^+ ≈0.6%	−74.756	0(−)	
		151	*47.9%*		−74.650	5/2+	5.8×10^{3} $_g$ 3.2×10^{3} $_{m1}$ 4 $_{m2}$
		152	13 y	EC 73.0%, β^+ 0.019%,β^- 27 0%	−72.884	3−	
		$152m_1$	9.3 h	β^- 76%,EC 24%, β^+ 0.011%	−72.836	0−	<3 rs
		$152m_2$	96 m	IT	−72 736	8−	
		153	*52.1%*		−73.363	5/2+	380 $_g$
		154	8.5 y	β^- 99.98%,EC 0.02%	−71.726	3−	
		154m	46 m	IT	−≈71.57	(8−)	
		155	4.9 y	β^-	−71.825	5/2+	4.0×10^{3}
		156	15 d	β^-	−70.083	0+	
		157	15.13 h	β^-	−69.465	(5/2+)	
		158	45.9 m	β^-	−67.24	(1−)	
		159	18.1 m	β^-	−65.93	(5/2+)	
		160	0.8 m	β^-	−63.54 s	(0−)	
		160	≈2.5 m?	β^-			
64	Gd	143	1.83 m	β^++EC	−68.51 s	(11/2,13/2−)	
		143	39 s?	?			
		144	4.5 m	β^++EC	−71.94 s	0+	
		145	22 m	β^+,EC	−72.94 s	1/2+	
		145m	85 s	IT 95.3%,β^++EC 4.7%	−72.19 s	11/2−	
		146	48.3 d	EC 99.93%,β^+ 0.07%	−75.361	0+	
		146	7 h?	α,EC			
		147	38.1 h	EC 99.74%,β^+ 0.26%	−75.207	7/2−	
		148	98 y	α	−76.268	0+	
		149	9.3 d	EC 99+%,α 5×10^{-4}%	−75.131	7/2−	
		150	1.8×10^{6} y	α	−75.765	0+	
		151	120 d	EC 99+%,α ≈8×10^{-7}%	−74.168	7/2−	
		152	*0.20%* 1.1×10^{14} y	α	−74.703	0+	1.1×10^{3}
		153	241.6 d	EC	−73.119	3/2−	
		154	*2.1%*		−73.704	0+	90
		155	*14.8%*		−72.071	3/2−	6.1×10^{4}
		156	*20.6%*		−72.536	0+	2
		157	*15.7%*		−70.825	3/2−	2.55×10^{5}
		158	*24.8%*		−70.691	0+	2.4
		159	18.6 h	β^-	−68.562	3/2−	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
64	Gd	160	*21.8%*		−67.943	0+	0.77
		161	3.7 m	β^-	−65.507	5/2−	4×10^{4} rs
		162	9 m	β^-	−64.36	0+	
65	Tb	146	23 s	β^++EC	−67.26 s	(4−)	
		147	1.6 h	EC 95%,β^+ 5%	−70.51 s	5/2+	
		147	1.9 m	EC,β^+	−70.51 s	11/2−	
		148	2.2 m	EC+β^+		(9+)	
		148	60 m	EC 80%,β^+ 20%	−70.64	2−	
		149	4.15 h	EC 79%,β^+ 4.0%, α 17%	−71.434	(3/2,5/2+)	
		149m	4.2 m	(EC,β^+) 99+%, α 0.020%	−71.394	(11/2−)	
		150	3.3 h	EC 90%,β^+ 10%, α ≤0.05%	−71.098	(2)−	
		150	6.0 m	EC+β^+		(8,9+)	
		151	17.6 h	EC 99%,β^+ ≈1%, α 0.009%	−71.608	1/2(+)	
		152	17.5 h	EC 87%,β^+ 13%	−70.853	2−	
		152m	4.2 m	IT 78%,EC 22%	−70.351	(8+)	
		153	2.30 d	EC 99+%,β^+ 0.04%	−71.329	5/2+	
		154	21 h	EC 98%,β^+ 2%	−70.24	0(+)	
		$154m_1$	9 h	EC+β^+ 78%,IT 22%		3(−)	
		$154m_2$	23 h	EC 98%,IT 2%		(7,8−)	
		155	5.3 d	EC	−71.256	3/2+	
		156	5.3 d	EC	−70.098	3−	
		156m	5.0 h	IT,EC,β^+ 0.02%, β^-(weak)	−70.010	(0)+	
		156	24 h	IT			
		157	150 y	EC	−70.767	3/2+	
		158	150 y	EC 82%,β^- 18%	−69.475	3−	
		158m	10.5 s	IT	−69.365	0−	
		159	*100%*		−69.536	3/2+	23
		160	72.1 d	β^-	−67.840	3−	500 rs
		161	6.90 d	β^-	−67.466	3/2+	
		162	7.7 m	β^-	−65.76	(1)−	
		163	19.5 m	β^-	−64.68	3/2+	
		164	3.0 m	β^-	−62.11	(5+)	
66	Dy	147m	59 s	IT,EC?	−63.46 s		
		148	3.1 m	EC+β^+	−67.77 s	0+	
		149	4.1 m	β^++EC	−67.53 s	(7/2−)	
		150	7.17 m	(EC,β^+) 69%,α 31%	−69.14 s	0+	
		151	17 m	EC+β^+ 94%,α 6%	−68.601	7/2−	
		152	2.37 h	EC 99.91%,α 0.09%	−70.116	0+	
		153	6.3 h	(EC,β^+) 99+%, α 0.010%	−69.155	7/2(−)	
		154	≈1×10^{7} y	α	−70.392	0+	
		155	10.0 h	EC 97%,β^+ 3%	−69.157	3/2−	
		156	*0.057%*		−70.527	0+	33 sc
		157	8.1 h	EC	−69.425	3/2−	
		158	*0.100%*		−70.410	0+	70 m
		159	144.4 d	EC	−69.171	3/2−	
		160	*2.3%*		−69.674	0+	60
		161	*19.0%*		−68.056	5/2+	570
		162	*25.5%*		−68.181	0+	160
		163	*24.9%*		−66.382	5/2−	130
		164	*28.1%*		−65.967	0+	1.8×10^{3} m 900 g
		165	2.33 h	β^-	−63.611	7/2+	4.0×10^{3} m
		165m	1.26 m	IT 97.8%,β^- 2.2%	−63.503	1/2−	2.1×10^{3} m
		166	81.5 h	β^-	−62.583	0+	
		167	6.2 m	β^-	−59.97	(1/2−)	
67	Ho	150	40 s	β^++EC	−62.04 s	(8,9+)	
		151	47 s	β^++EC 90%,α 10%	−63.44 s		
		151	35.6 s	β^++EC 80%,α 20%	−63.44 s		
		152	52 s	β^++EC 94%,α 6%		(9+)	
		152	2.4 m	β^++EC 98.3%,α 1.7%	−63.71	(3+)	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
67	Ho	153	2.0 m	EC+β^+ 99.96%, α 0.04%			
		153	9.3 m	EC+β^+ 99.9%,α 0.1%	-64.954		
		153	27 m?	α			
		154	12 m	β^++EC 99+%,α 0 017%	-64.635	1	
		154	3.2 m	EC+β^+ 99+%, α <0.002%			
		155	49 m	EC,β^+,α	-66.055	5/2	
		156	56 m	β^++EC,IT		1	
		156	2 m	β^++EC	-65.43 s	(5+)	
		156	7.4 m?	β^++EC			
		157	12.6 m	β^+,EC	-66.89	7/2-	
		158	11.5 m	EC,β^+	-66.433	5+	
		158m_1	27 m	IT 65%,EC+β^+ 35%	-66.366	2-	
		158(m_2)	21 m	EC+β^+		(9+)	
		159	33 m	EC	-67.318	7/2-	
		159m	8.3 s	IT	-67.112	1/2+	
		160	25.6 m	EC 99+%,β^+ ≈0.4%	-66.388	5+	
		160m	5.02 h	IT 65%,(EC,β^+) 35%	-66.328	2-	
		160	3 s	?			
		160	7 m	?		1+)	
		160	≈1 h	?		(9+)	
		161	2.48 h	EC	-67.203	7/2-	
		161m	6.7 s	IT	-66.992	1/2+	
		162	15 m	EC 95%,β^+ 5%	-66.047	1+	
		162m	68 m	IT 61%,EC+β^+ 39%	-≈65.94	6-	
		163	≈33 y	EC,no γ	-66.379	7/2-	
		163m	1.09 s	IT	-66.081	1/2+	
		164	29.0 m	EC 58%,β^- 42%	-64.937	1+	
		164m	37 m	IT	-64.797	6(-)	
		165	*100%*		-64.896	7/2-	62_g 3_m
		166	26.80 h	β^-	-63.067	0-	
		166m	1.2×10^3 y	β^-	-63.062	(7-)	
		167	3.1 h	β^-	-62.316	(7/2-)	
		168	3.0 m	β^-	-60.27	3+	
		169	4.6 m	β^-	-58.793	(7/2-)	
		170	43 s	β^-	-56.10		
		170	2.8 m	β^-	-56.09		
68	Er	151	23 s	β^++EC	-58.20 s		
		152	10 s	α ≈90%,EC+β^+ ≈10%	-60.41 s	0+	
		153	36 s	EC+β^+ ≈62%,α ≈38%	-60.31 s		
		154	3.8 m	EC+β^+ 99.5%,α 0.5%	-62.44 s	0+	
		155	5 m	EC+β^+ 99+%,α ≥0.02%	-62.057		
		156	20 m	EC+β^+	-63.93 s	0+	
		157	24 m	β^+,EC	-63.09 s	3/2-	
		158	2.4 h	EC,β^+	-65.03 s	0+	
		159	36 m	EC,β^+	-64.39	3/2-	
		160	28.6 h	EC,no γ	-66.052	0+	
		161	3.24 h	EC 99.96%,β^+ 0.04%	-65.197	3/2-	
		162	*0.14%*		-66.335	0+	19
		163	75.1 m	EC 99+%,β^+ 0.004%	-65.168	5/2-	
		164	*1.56%*		-65.940	0+	13
		165	10.4 h	EC,no γ	-64.518	5/2-	
		166	*33.4%*		-64.921	0+	15_m^{rs} 5_g^{rs}
		167	*22.9%*		-63.286	7/2+	650^{rs}
		167m	2.28 s	IT	-63.078	1/2-	
		168	*27.1%*		-62.985	0+	2.0
		169	9.40 d	β^-	-60.917	1/2-	
		170	*14.9%*		-60.104	0+	5.7
		171	7.52 h	β^-	-57.714	5/2-	300^{rs}
		172	49.5 h	β^-	-56.491	0+	
		173	1.4 m	β^-	-53.73	(7/2-)	
		173	12 m	β^-			
69	Tm	153	1.6 s	α	-53.87 s		
		154	5 s	α	-54.53 s		
		154	3.0 s	α	-54.53 s		

Nuclide Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
69	Tm	155	39 s	α	−56.45 s		
		156	80 s	α,β^++EC	−56.94 s		
		156	19 s	α	−56.94 s		
		157	3.6 m	EC+β^+	−58.49 s		
		158	4.0 m	β^++EC	−58.43 s		
		159	9.0 m	EC,β^+	−60.19 s	5/2(+)	
		160	9.2 m	EC 85%,β^+ 15%	−60.13	1−	
		161	30 m	EC,β^+	−61.68 s	7/2(+)	
		161	7 m?	?			
		162	22 m	EC 93%,β^+ 7%	−61.54	1−	
		162m	24 s	IT 90%,EC+β^+ 10%		(5+)	
		163	1.8 h	EC 99.8%,β^+ 0.2%	−62.99	1/2+	
		163m	11 m	IT?,EC?			
		164	2.0 m	EC 61%,β^+ 39%	−61.978	1+	
		164m	5.1 m	IT ≈80%,EC+β^+ ≈20%		6(−)	
		165	30.06 h	EC 99+%,β^+ 0.007%	−62.924	1/2+	
		166	7.7 h	EC 98%,β^+ 2%	−61.874	2+	
		167	9.25 d	EC	−62.537	1/2+	
		168	93.1 d	EC ≈98%,β^-? ≈2%	−61.306	3(+)	
		169	*100%*		−61.269	1/2+	98_g
		170	128.6 d	β^- 99+%,EC 0.144%	−59.791	1−	92^{sc}
		171	1.92 y	β^-	−59.205	1/2+	4.5^{sc}
		172	63.6 h	β^-	−57.380	2−	
		173	8.2 h	β^-	−56.226	(1/2+)	
		174	5.4 m	β^-	−53.85	(4−)	
		175	15 m	β^-	−52.29	(1/2+)	
		176	1.9 m	β^-	−49.59 s	(4+)	
		176	1.5 m?	β^-			
70	Yb	154	0.39 s	α	−50.05 s	0+	
		155	1.6 s	α	−50.45 s		
		156	24 s	α	−53.06 s	0+	
		157	34 s	α	−53.27 s		
		158	1.1 m	EC+β^+	−55.53 s	0+	
		160	4.8 m	EC+β^+	−57.55 s	0+	
		161	4.2 m	β^++EC	−57.40 s		
		162	18.9 m	EC ≥98%,β^+ ≤2%	−59.34 s	0+	
		163	11.0 m	EC+β^+	−59.62	(3/2−)	
		164	76 m	EC	−60.88 s	0+	
		165	10 m	EC,β^+	−60.161	(5/2)−	
		166	56.7 h	EC	−61.592	0+	
		167	17.5 m	EC 99.6%,β^+ 0.4%	−60.583	5/2−	
		168	*0.135%*		−61.565	0+	$3.5\times10^3{}_{g+m}$
		169	32.0 d	EC	60.361	7/2+	
		169m	46 s	IT	−60.337	1/2−	
		170	*3.1%*		−60.759	0+	10
		171	*14.4%*		−59.302	1/2−	53
		172	*21.9%*		−59.250	0+	1
		173	*16.2%*		−57.546	5/2−	17
		174	*31.6%*		−56.940	0+	19_g
		175	4.19 d	β^-	−54.691	7/2−	
		176	*12.6%*		−53.490	0+	2.4_{g+m}
		176m	11.7 s	IT	−52.439	(8)−	
		177	1.9 h	β^-	−50.986	9/2+	
		177m	6.4 s	IT	−50.655	1/2−	
		178	74 m	β^-	−49.66	0+	
71	Lu	155	0.07 s	α	−42.60 s		
		156	0.23 s	α	−43.81 s		
		156	≈0.5 s	α	−43.81 s		
		162	1.4 m?	β^++EC	−52.34 s		
		164	3.17 m	β^++EC	−54.58 s		
		165	11.8 m	EC+β^+	−56.16 s	1/2	
		166	2.6 m	EC,β^+	−56.10	(6−)	
		$166m_1$	1.4 m	EC+β^+ 58%,IT 42%	−56.07	(3−)	
		$166m_2$	2.1 m	EC+β^+ >80%	−56.06	(0−)	
		167	52 m	EC 98.2%,β^+ 1.8%	−57.45	7/2+	
		168	5.5 m	EC,β^+	−57.10	(6)−	
		168m	6.7 m	EC ≈88%,β^+ ≈12%	−56.88	3+	
		169	34.1 h	EC 99.3%,β^+ 0.7%	−57.881	7/2+	
		169m	2.7 m	IT	−57.852	1/2−	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
71	Lu	170	2.02 d	EC,β^+	-57.319	0+	
		170m	0.7 s	IT	57.226	4-	
		171	8.25 d	EC 99+%,β^+ ≈0.005%	-57.821	7/2+	
		171m	79 s	IT	-57.750	1/2-	
		172	6.70 d	EC	-56.726	4-	
		172m	3.7 m	IT	-56.684	1-	
		173	1.37 y	EC	-56.871	7/2+	
		174	3.3 y	EC 99+%,β^+ 0.025%	-55.562	(1-)	
		174m	142 d	IT 99.3%,EC 0.7%	-55.391	(6-)	
		175	*97.39%*		-55.159	7/2+	16_m 10_g
		176	*2.61%* 3.6×10^10 y	β^-	-53.381	7-	$2.0\times10^3{}_g$
		176m	3.68 h	β^-	-53.254	1-	7_m
		177	6.71 d	β^-	-52.382	7/2+	
		177m	160.5 d	β^- 78%,IT 22%	-51.412	23/2-	
		178	28.4 m	β^-	-50.30	1+	
		178m	23 m	β^-	-≈50.00	(9)-	
		178	5 m?	β^-			
		179	4.6 h	β^-	-49.11	(7/2+)	
		180	5.7 m	β^-	-46.68		
72	Hf	157	0.12 s	α	-38.96 s		
		158	3.0 s	α	-42.22 s	0+	
		159	5.6 s	α	-42.80 s		
		160	≈12 s	α	-45.75 s	0+	
		161	17 s	α	-46.13 s		
		166	6.8 m	EC+β^+	-53.48 s	0+	
		167	2.05 m	EC,β^+	-53.15 s	(5/2-)	
		168	25.9 m	EC ≈98%,β^+? ≈2%	-55.10 s	0+	
		169	3.3 m	EC 86%,β^+ 14%	-54.53	(5/2)-	
		170	16.0 h	EC	-56.12 s	0+	
		171	12.1 h	EC+β^+	-55.30 s	7/2+	
		172	1.87 y	EC	-56.33 s	0+	
		173	24.0 h	EC	-55.27 s	1/2-	
		174	*0.16%* 2.0×10^15 y	α	-55.830	0+	400
		175	70 d	EC	-54.548	5/2-	
		176	*5.2%*		-54.567	0+	30_g
		177	*18.6%*		-52.879	7/2-	390_g 1.0_{m1}
		177m₁	1.1 s	IT	-51.564	23/2+	$2\times10^{-7}{}^{rs}_{m2}$
		177m₂	51 m	IT	-50.139	37/2-	
		178	*27.1%*		-52.434	0+	50_{m1} 40_g
		178m₁	4.0 s	IT	-51.287	8-	
		178m₂	31 y	IT	-49.987	16+	
		179	*13.7%*		-50.462	9/2+	50_g 0.4^{sc}_m
		179m₁	18.7 s	IT	-50.087	1/2-	
		179m₂	25.1 d	IT	-49.356	25/2-	
		180	*35.2%*		-49.779	0+	14
		180m	5.5 h	IT	-48.637	8-	
		181	42.4 d	β^-	-47.403	1/2-	30^{rs}_g
		182	9×10^6 y	β^-	-45.99	0+	
		182m	62 m	β^- 54%,IT 46%	-44.82	(8-)	
		183	64 m	β^-	-43.269	(3/2-)	
		184	4.12 h	β^-	-41.48	0+	
73	Ta	166	32 s	β^++EC	-46.10 s		
		167	3 m	β^++EC	-47.95 s		
		168	2.4 m	β^++EC	-48.40 s	(2-,3+)	
		169	5 m	EC+β^+	-50.03 s		
		170	6.8 m	β^+,EC	-50.12 s	(3+)	
		171	24 m	EC+β^+	-51.60 s		
		171	2.0 m?	?			
		171	6.3 m?	?			

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_a(b)
73	Ta	172	37 m	EC ≈85%,β^+ ≈15%	−51.41 s	(3−)	
		173	3.6 h	EC,β^+	−52.37 s	(5/2−)	
		174	1.1 h	EC,β^+	−51.98	3(+)	
		175	10.5 h	EC,β^+	−52.35 s	7/2+	
		176	8.1 h	EC 99.3%,β^+ 0.7%	−51.47	(1−)	
		177	56.6 h	EC 99+%, β^+ 2.9×10^{-4}%	−51.721	7/2+	
		178	9.3 m	EC 98.9%,β^+ 1.1%	−50.52	1+	
		178	2.4 h	EC		(7)−	
		179	1.7 y	EC,no γ	−50.347	(7/2+)	
		180(g)	*0.012%* $\geq1\times10^{13}$ y			(8+)	700
		180(m)	8.1 h	EC 87%,β^- 13%	−48.914	1	
		181	*99.9877%*		−48.425	7/2+	21_g 0.010_{m2}
		182	115 d	β^-	−46.417	3−	8.2×10^3
		$182m_1$	0.28 s	IT	−46.400	5+	
		$182m_2$	15.8 m	IT	−45.897	10−	
		183	5.1 d	β^-	−45.279	7/2+	
		184	8.7 h	β^-	−42.821	(5−)	
		185	49 m	β^-	−41.360	(7/2+)	
		186	10.5 m	β^-	−38.60	(3−)	
74	W	160	≤0.2 s?	α		0+	
		162	<0.25 s	α	−34.13 s	0+	
		163	2.5 s	α,(β^++EC)?	−35.31 s		
		164	6 s	α	−38.04 s	0+	
		165	5.1 s	α	−38.67 s		
		166	16 s	α	−41.48 s	0+	
		170	4 m	EC+β^+	−46.92 s	0+	
		171	9 m	EC+β^+	−46.90 s		
		172	6.7 m	EC,β^+	−48.81 s	0+	
		173	16 m	EC+β^+	−48.47 s		
		174	29 m	EC	−50.08 s	0+	
		175	34 m	EC+β^+	−49.45 s	(1/2−)	
		176	2.3 h	EC	−50.57 s	0+	
		177	135 m	EC+β^+	−49.72 s	(1/2−)	
		178	21.5 d	EC,no γ	−50.43	0+	
		179	38 m	EC	−49.283	(7/2−)	
		179m	6.4 m	IT 99.69%,EC 0.31%	−49.061	(1/2−)	
		180	*0.13%*		−49.624	0+	≈10[illegible]
		181	121 d	EC	−48.237	9/2+	
		182	*26.3%*		−48.228	0+	21_{g+m}
		183	*14.3%*		−46.347	1/2−	10.1
		183m	5.3 s	IT	−46.038	(11/2)+	
		184	*30.7%*		−45.687	0+	1.8_g 0.002_m
		185	75.1 d	β^-	−43.370	3/2−	
		185m	1.66 m	IT	−43.173	11/2+	
		186	*28.6%*		−42.498	0+	38
		187	23.9 h	β^-	−39.893	3/2−	70
		188	69.4 d	β^-	−38.657	0+	
		189	11.5 m	β^-	−35.47		
		190	30 m	β^-	−34.22	0+	
75	Re	170	8.0 s	β^++EC	−38.92 s		
		172	30 s	β^++EC	−41.51 s		
		174	2.3 m	β^++EC	−43.58 s		
		175	4.6 m	EC+β^+	−45.15 s		
		176	5.2 m	EC+β^+	−44.97 s		
		177	14 m	EC+β^+	−46.12 s	(5/2−)	
		178	13.2 m	EC 89%,β^+ 11%	−45.77	(3)	
		179	19.7 m	EC 99.1%,β^+ 0.9%	−46.59	(5/2+)	
		180	2.4 m	EC 92%,β^+ 8%	−45.829	(1)−	
		181	20 h	EC	−46.44 s	5/2+	
		182	64 h	EC	−45.43 s	7+,6±	
		182	12.7 h	EC 99.8%,β^+ 0.2%	−45.43 s	2+	
		183	71 d	EC	−45.791	(5/2)+	
		184	38 d	EC	−44.191	3−	
		184m	169 d	IT 75%,EC 25%	−44.003	8+	
		184	2.2 d?	?			

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
75	Re	185	*37.40%*		−43.802	5/2+	110_g 0.3_m^{ec}
		186	90.6 h	β^- 92.2%,EC 7.8%	−41.910	1−	
		186m	2×10^5 y	IT	−≈41.76	[8+]	
		187	*62.60%* 4×10^{10} y	β^-,no γ	−41.205	5/2+	74_g 1.0_m
		188	16.9 h	β^-	−39.006	1−	
		188m	18.7 m	IT	−38.834	(6)−	
		189	24.3 h	β^-	−37.970	(5/2+)	
		189	4.3 d?	β^-			
		190	3.1 m	β^-	−35.52	(2−)	
		190m	3.2 h	β^- ≈51%,IT ≈49%	−≈35.30	(6−)	
		191	9.8 m	β^-	−34.343		
		192	16 s	β^-	−≈31.9 s		
76	Os	169	3.0 s	α	−30.55 s		
		170	7.1 s	α	−33.53 s	0+	
		171	8 s	α	−34.16 s		
		172	19 s	EC+β^+ 99+%,α ≤0.3%	−36.84 s	0+	
		173	16 s	β^++EC 99.98%, α 0.02%	−37.41 s		
		174	45 s	EC+β^+ 99.98%, α 0.02%	−39.62 s	0+	
		175	1.4 m	[EC+β^+]	−39.71 s		
		176	3.6 m	EC+β^+	−41.81 s	0+	
		177	4 m	EC+β^+	−41.62 s		
		178	5.0 m	EC+β^+	−43.35 s	0+	
		179	7 m	EC+β^+	−42.89 s		
		180	22 m	EC	−44.22 s	0+	
		181	105 m	EC+β^+		(1/2−)	
		181	2.7 m	EC,β^+	−43.41 s	(7/2−)	
		182	22.0 h	EC	−44.58 s	0+	
		183	13 h	EC 99.91%,β^+ 0.09%	−43.49 s	9/2+	
		183m	9.9 h	EC 89%,IT 11%	−43.32 s	1/2−	
		184	*0.018%*		−44.233	0+	3×10^3
		185	93.6 d	EC	−42.787	1/2−	
		186	*1.6%* 2×10^{15} y	α	−42.987	0+	80
		187	*1.6%*		−41.208	1/2−	330
		188	*13.3%*		−41.125	0+	$\leq 5_g$
		189	*16.1%*		−38.978	3/2−	20_g $2.6\times10^{-4}{}_m$
		189m	5.7 h	IT	−38.947	9/2−	
		190	*26.4%*		−38.699	0+	9_m 4_g
		190m	9.9 m	IT	−36.994	10−	
		191	15.4 d	β^-	−36.388	9/2−	
		191m	13.1 h	IT	−36.314	3/2−	
		192	*41.0%*		−35.875	0+	2.0
		192m	6.1 s	IT	−33.860	(10−)	
		193	30.6 h	β^-	−33.387	(3/2−)	1.5×10^{3} m
		194	6.0 y	β^-	−32.417	0+	
		195	6.5 m	β^-	−29.69		
		196	35.0 m	β^-		0+	
77	Ir	171	1.0 s	α	−26.18 s		
		172	1.7 s	α	−27.32 s		
		173	3.0 s	α	−29.91 s		
		174	4 s	α	−30.89 s		
		175	4 s	α	−33.16 s		
		176	8 s	α	−33.84 s		
		177	21 s	α	−35.82 s		
		178	12 s	β^++EC	−36.27 s		
		179	4 m	EC+β^+	−37.89 s		
		180	1.5 m	EC+β^+	−37.93 s		
		181	5 m	EC+β^+	−39.34 s		
		182	15 m	EC+β^+	−38.98 s		
		183	0.9 h	EC+β^+	−40.09 s	(9/2−)	
		184	3.0 h	EC,β^+	−39.51	5	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
77	Ir	185	14 h	EC+β^+	−40.29 s	5/2(−)	
		186	16 h	EC 98%,β^+ 2%	−39.156	5(+)	
		186	1.7 h	EC,β^+		(2−)	
		187	10.5 h	EC	−39.71 s	3/2+	
		188	41.5 h	EC 99.6%,β^+ 0.4%	−38.323	2−	
		189	13.1 d	EC	−38.48 s	3/2+	
		190	11.8 d	EC	−36.70	(4+)	
		190m_1	1.2 h	IT	−36.67	(7+)	
		190m_2	3.2 h	EC 95%,IT 5%	−36.52	(11−)	
		191	*37.3%*		−36.698	3/2+	540_{g} 400_{m1} 0.10_{m2}
		191m	4.9 s	IT	−36.527	11/2−	
		192	74.2 d	β^- 95.4%,EC 4.6%	−34.826	4(−)	$1.0\times10^{3\,rs}_{g}$
		192m_1	1.45 m	IT 99+%,β^- 0.017%	−34.768	1(+)	
		192m_2	241 y	IT	−34.665	9(+)	
		193	*62.7%*		−34.519	3/2+	110_{g}
		193m	10.6 d	IT	−34.439	11/2−	0.05_{m}
		194	19.2 h	β^-	−32.514	1−	
		194m	0.47 y	β^-		(11)	
		195	2.5 h	β^-	−31.692	(3/2+)	
		195m	3.8 h	β^-	−31.57	(11/2−)	
		196	52 s	β^-	−29.44	(0,1−)	
		196m	1.40 h	β^-	−29.01	(10,11)	
		197	9.8 m	β^-	−28.43		
		198	8 s	β^-	−25.52		
78	Pt	173	≲1 s	α	−21.79 s		
		174	0.7 s	α ≈80%	−24.93 s	0+	
		175	2.4 s	α ≈75%	−25.64 s		
		176	6.3 s	α 42%	−28.54 s	0+	
		177	7 s	α 9%	−29.35 s		
		178	21 s	α 7%	−31.63 s	0+	
		179	33 s	α 0 27%	−32.01 s	1/2	
		180	52 s	α ≈0.3%	−34.12 s	0+	
		181	51 s	α ≈0.06%	−34.06 s		
		182	2.6 m	EC+β^+ 99+%,α ≈0.02%	−35.98 s	0+	
		183	7 m	EC+β^+ 99+%, α ≈0.0013%	−35.63 s		
		184	17.3 m	EC+β^+ 99+%, α ≈0.001%	−37.21 s	0+	
		184	42 m?	EC			
		185	71 m	EC+β^+	−36.49 s		
		185	33 m	EC+β^+	−36.49 s		
		186	2.0 h	EC 99+%, α ≈1.4×10^{-4}%	−37.83 s	0+	
		187	2.35 h	EC+β^+	−36.81 s	3/2	
		188	10.2 d	EC 99+%,α 3×10^{-5}%	−37.788	0+	
		189	10.9 h	EC,β^+	−36.57 s	3/2−	
		190	*0.013%* 6×10^{11} y	α	−37.318	0+	800
		191	2.9 d	EC	−35.698	3/2−	
		192	*0.78%*		−36.283	0+	10_{g+m} 2^{rs}_{m}
		193	50 y	EC,no γ	−34.458	(1/2)−	
		193m	4.3 d	IT	−34.308	(13/2)+	
		194	*32.9%*		−34.765	0+	$\approx1^{rs}_{g}$ 0.09^{rs}_{m}
		195	*33.8%*		−32.802	1/2−	27^{rs}
		195m	4.02 d	IT	−32.543	13/2+	
		196	*25.3%*		−32.652	0+	0.7^{rs}_{g} 0.05^{rs}_{m}
		197	18.3 h	β^-	−30.431	1/2−	
		197m	94 m	IT 97%,β^- 3%	−30.032	13/2+	
		198	*7.2%*		−29.921	0+	3.7_{g} 0.027_{m}

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
78	Pt	199	30.8 m	β^-	−27.420	(5/2−)	≈15 rs
		199m	14 s	IT	−26.996	(13/2+)	
		200	12.6 h	β^-	−26.60 s	0+	
		201	2.5 m	β^-	−23.74		
79	Au	175	≈0.14 s	α	−17.16 s		
		176	1.2 s	α	−18.40 s		
		177	1.3 s	α	−21.19 s		
		178	2.6 s	α	−22.41 s		
		179	7.5 s	α	−24.75 s		
		181	11 s	α 1.1%	−27.64 s		
		182	21 s	β^++EC 99+%, α? ≈0.04%	−28.18 s		
		183	42 s	α 0.30%	−30.01 s		
		184	53 s	β^++EC 99+%,α 0.022%	−30.22 s		
		185	4.3 m	EC+β^+ 99.91%, α 0.09%	−31.73 s		
		185	6.8 m	EC+β^+	−31.73 s		
		186	11 m	EC+β^+	−31.69 s	3	
		186	≤2 m	EC+β^+	−31.69 s		
		187	8 m	EC+β^+,α?	−32.87 s	1/2	
		188	8.8 m	EC+β^+	−32.49 s	1	
		189	28.7 m	EC+β^+	−33.41 s	1/2+	
		189m	4.6 m	EC+β^+,IT?	−33.16 s	11/2−	
		190	43 m	EC 98%,β^+ 2%	32.876	1−	
		191	3.2 h	EC	−33.87	3/2+	
		191m	0.9 s	IT	−33.60	(11/2−)	
		192	5.0 h	EC ≈99%,β^+ ≈1%	−32.768	1−	
		193	17.5 h	EC,β^+?	−33.36 s	3/2+	
		193m	3.9 s	IT 99.97%,EC 0.03%	−33.07 s	11/2−	
		194	39.5 h	EC ≈97%,β^+ ≈3%	−32.256	1−	
		195	183 d	EC	−32.572	3/2+	
		195m	30.6 s	IT	−32.253	11/2−	
		196	6.18 d	EC 93.0%,β^+ 5×10^{-5}%, β^- 7.0%	−31.162	2−	
		196m_1	8.2 s	IT	−31.077	5+	
		196m_2	9.7 h	IT	−30.567	12−	
		197	100%		−31.150	3/2+	98.8
		197m	7.7 s	IT	−30.741	11/2−	
		198	2.696 d	β^-	−29.591	2−	2.5×10^4
		198m	2.30 d	IT	−28.779	(12−)	
		199	3.14 d	β^-	−29.104	3/2+	≈30 rs g
		200	48.4 m	β^-	−27.30	1(−)	
		200m	18.7 h	β^- ≈84%,IT ≈16%	−≈26.3	12(−)	
		201	26 m	β^-	−26.40	(3/2+)	
		202	29 s	β^-	−23.86	(1−)	
		203	53 s	β^-	−22.98 s		
		204	4 s?	β^-			
		204	40 s	β^-			
80	Hg	177	≈0.2 s	α	−12.65 s		
		178	0.5 s	α ≈84%,[EC+β^+] ≈16%	−15.93 s	0+	
		179	1.09 s	α ≈53%,EC+β^+ ≈47%, (EC+β^+)p	−16.80 s		
		179	3.5 s?	α	−16.80 s		
		180	2.9 s	α	−19.86 s	0+	
		180	5.9 s?	α			
		181	3.6 s	β^++EC 74%,α 26%, (β^++EC)p 0.014%, (β^++EC)α 9×10^{-6}%	−20.79 s	1/2(−)	
		182	11 s	EC+β^+ 91%,α 9%	−23.21 s	0+	
		183	8.8 s	EC 61%,β^+ 27%, α 12%, (EC+β^+)p 3×10^{-4}%	−23.69 s	1/2	
		184	30.6 s	EC+β^+ 98.7%,α 1.3%	−26.04 s	0+	
		185(g)	48 s	EC+β^+ ≤95%,α ≥5%	−26.14 s	1/2−	
		185(m)	17 s	α,IT?			
		185	155 s	?			
		186	1.4 m	EC 96%,β^+ 4%, α 0.016%	−28.35 s	0+	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
80	Hg	187	1.6 m	EC+β^+,α >2.5×10^{-4}%	−28.06 s		
		187	2.4 m	EC+β^+,α >1.2×10^{-4}%	−28.06 s	3/2	
		187	3.0 m	EC+β^+,α			
		188	3.3 m	EC+β^+	−29.88 s	0+	
		189	8.7 m	EC+β^+	−29.21 s	(13/2+)	
		189	7.5 m	EC+β^+	−29.21 s	3/2−	
		190	20 m	EC	−30.96	0+	
		191	≈49 m	EC+β^+	−30.48	(3/2−)	
		191m	51 m	EC+β^+	−≈30.34	(13/2+)	
		192	4.9 h	EC	−31.97 s	0+	
		193	4 h	EC,β^+?	−31.02 s	3/2−	
		193m	11 h	EC 92%,β^+ 0.34%, IT 8%	−30.88 s	13/2+	
		194	260 y	EC,no γ	−32.206	0+	
		194	0.40 s	?			
		195	10 h	EC	−31.05	1/2−	
		195m	41 h	EC 50%,IT 50%	−30.87	13/2+	
		196	*0.15%*		−31.846	0+	$3.0\times10^{3}{}^{sc}_{g}$ 120^{sc}_{m}
		197	64.1 h	EC	−30.735	1/2−	
		197m	23.8 h	IT 93%,EC 7%	−30.436	13/2+	
		198	*10.0%*		−30.964	0+	0.018_{m}
		199	*16.8%*		−29.557	1/2−	2×10^{3}
		199m	42.6 m	IT	−29.025	13/2+	
		200	*23.1%*		−29.514	0+	<60
		201	*13.2%*		−27.672	3/2−	<60
		202	*29.8%*		−27.356	0+	5.0
		203	46.8 d	β^-	−25.277	5/2−	
		204	*6.9%*		−24.703	0+	0.4^{rs}
		205	5.2 m	β^-	−22.299	1/2−	
		206	8.1 m	β^-	−20.955	0+	
81	Tl	184	11 s	β^++EC 98%,α 2%	−16.90 s		
		185m	1.7 s	α,IT	−18.66 s	(9/2−)	
		185	28 s	(β^+,EC) 99+%, α? ≈0.006%	−19.86 s		
		186m	3 s	IT	−19.49 s		
		187m	16 s	α,IT	−≈21.60 s	(9/2−)	
		188	71 s	β^+,EC	−22.29 s	(7)	
		189	1.4 m	β^++EC	−24.02 s		
		189	2.3 m	β^++EC	−24.02 s		
		190	2.6 m	β^+,EC	−24.16	(2−)	
		190	3.7 m	β^+,EC		(7+)	
		191	5.2 m	EC 98%,β^+ 2%	−25.67		
		192	10.8 m	EC+β^+	−25.59 s	(7+)	
		192	10.6 m	EC+β^+	−25.59 s	(2−)	
		193	22 m	EC ≥96%,β^+ ≤4%	−27.02 s	1/2+	
		193m	2.1 m	IT		(9/2−)	
		194	33.0 m	EC+β^+	−26.81 s	2−	
		194m	32.8 m	EC+β^+	−≈26.51 s	(7+)	
		195	1.16 h	EC 99.3%,β^+ 0.7%	−27.85	1/2+	
		195m	3.6 s	IT	−27.37	9/2−	
		196	1.84 h	EC+β^+	−27.35 s	2(−)	
		196m	1.41 h	EC+β^+ 96.2%,IT 3.8%	−26.95 s	(7+)	
		197	2.84 h	EC 99.5%,β^+ 0.5%	−28.33 s	1/2+	
		197m	0.54 s	IT	−27.72 s	9/2−	
		198	5.3 h	EC ≈99.3%,β^+ ≈0.7%	−27.50	2−	
		198m	1.87 h	EC+β^+ 56%,IT 44%	−26.96	7+	
		199	7.4 h	EC	−28.08	1/2+	
		200	26.1 h	EC 99.65%,β^+ 0.35%	−27.060	2−	
		201	73 h	EC	−27.185	1/2+	
		202	12.2 d	EC	−25.988	2−	
		203	*29.5%*		−25.769	1/2+	10
		204	3.77 y	β^- 97.4%,EC 2.6%	−24.353	2−	22^{rs}
		205	*70.5%*		−23.837	1/2+	0.10^{rs}_{g}
		206	4.20 m	β^-	−22.269	0−	
		206m	3.6 m	IT	−19.626	(12−)	
		207	4.77 m	β^-	−21.041	1/2+	
		207m	1.3 s	IT	−19.700	11/2−	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_a(b)
81	Tl	208	3.053 m	β^-	−16.768	(5+)	
		209	2.2 m	β^-	−13.650	(1/2+)	
		210	1.30 m	β^-,β^-n ≈0.007%	−9.251		
82	Pb	185	≈2 s	α	−11.74 s		
		186	8 s	α ≈2.4%	−14.33 s	0+	
		187	17 s	α ≈2.0%	−14.94 s		
		188	25 s	EC+β^+ 97%,α 3%	−17.50 s	0+	
		189	51 s	EC+β^+ 99+%,α ≈0.4%	−17.86 s		
		190	1.2 m	EC+β^+ 99.8%,α 0.2%	−20.22 s	0+	
		191	1.3 m	EC+β^+ 99+%,α 0.013%	−20.23 s		
		192	2.3 m	EC+β^+ 99+%,α 0.007%	−22.29 s	0+	
		193	5.8 m	EC+β^+	−22.07 s	(13/2+)	
		194	11 m	EC+β^+	−23.81 s	0+	
		195	16.4 m	EC+β^+	−23.55 s	(13/2+)	
		196	37 m	EC	−25.15 s	0+	
		197	?	EC+β^+	−24.63 s	(3/2−)	
		197m	42 m	EC+β^+ 81%,IT 19%	−24.31 s	(13/2+)	
		198	2.4 h	EC	−25.90 s	0+	
		199	1.5 h	EC ≈98.6%,β^+ ≈1.4%	−25.28	5/2−	
		199m	12.2 m	IT 93%,EC+β^+ 7%	−24.86	13/2+	
		200	21.5 h	EC	−26.16 s	0+	
		201	9.4 h	EC 99+%,β^+ ≤0.034%	−25.327	5/2−	
		201m	61 s	IT	−24.699	13/2+	
		202	≈3×10^5 y	EC,no γ	−25.942	0+	
		202m	3.62 h	IT 90.5%,EC 9.5%	−23.772	9−	
		203	52.0 h	EC	−24.794	5/2−	
		203m$_1$	6.1 s	IT	−23.969	13/2+	
		203m$_2$	0.48 s	IT	−21.844	29/2−	
		204	*1.42%*		−25.117	0+	0.7
		204m	66.9 m	IT	−22.932	9−	
		205	1.4×10^7 y	EC,no γ	−23.777	5/2−	3.8 rs
		206	*24.1%*		−23.795	0+	0.03 s
		207	*22.1%*		−22.463	1/2−	0.71 s
		207m	0.81 s	IT	−20.830	13/2+	
		208	*52.3%*		−21.759	0+	5.0×10^{-4}
		209	3.25 h	β^-,no γ	−17.624	9/2+	
		210	22.3 y	β^- 99+%,α 1.7×10^{-6}%	−14.738	0+	0.5
		211	36.1 m	β^-	−10.492	(9/2)+	
		212	10.64 h	β^-	−7.562	0+	
		213	10.2 m	β^-	−3.14 s		
		214	26.8 m	β^-	−0.185	0+	
83	Bi	189	<1.5 s	α	−9.87 s		
		190	5.4 s	α ≈90%	−10.85 s		
		191	13 s	α ≈40%	−13.05 s		
		191m	≈20 s	α			
		192	42 s	α ≈20%	−13.67 s		
		193	64 s	α ≈60%	−15.56 s		
		193m	3.5 s	α ≈25%			
		194	1.7 m	β^++EC 99+%,α <0.2%	−15.98	(10−)	
		195	2.8 m	α <0.2%	−17.68		
		195m	90 s	α 4%			
		196	4.5 m	β^++EC	−17.76 s		
		197(m)	8 m	β^++EC 99.89%, α 0.11%			
		198	11.8 m	EC+β^+	−19.30 s	(7+)	
		198m	7.7 s	IT	−19.05 s	(10−)	
		199(g)	27 m	EC	−20.61 s	9/2−	
		199(m)	24.7 m	α	−≈20.00 s		
		200	36 m	EC,β^+(weak)	−20.46 s	7(+)	
		200m	0.40 s	IT	−20.03 s	10(−)	
		201	1.8 h	EC+β^+	−21.41 s	9/2−	
		201m	59 m	EC+β^+,IT,α ≥0.02%	−20.56 s	(1/2+)	
		202	1.7 h	EC 99.5%,β^+ 0.5%	−21.04 s	5(+)	
		203	11.8 h	EC ≈99.7%,β^+ ≈0.3%	−21.60	9/2−	
		204	11.2 h	EC	−20.82 s	6+	
		205	15.3 d	EC 99.90%,β^+ 0.10%	−21.070	9/2−	
		206	6.243 d	EC,β^+? 8×10^{-4}%	−20.033	6+	
		207	38 y	EC 99+%,β^+ 0.012%	−20.058	9/2−	
		208	3.68×10^5 y	EC	−18.879	(5)+	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_a(b)
83	Bi	209	*100%*		−18.268	9/2−	0.019$^{rs}_{g}$ 0.014$^{rs}_{m}$
		210	5.01 d	β^- 99+%,α 1.3×10^{-4}%	−14.801	1−	0.050^{sc}
		210m	3.0×10^6 y	α	−14.530	9−	
		211	2.15 m	α 99.72%,β^- 0.28%	−11.865	(9/2)−	
		212	60.60 m	β^- 64.0%, $\beta^-\alpha$ 0.014%,α 36.0%	−8.135	1(−)	
		$212m_1$	25 m	α ≤93%,β^- ≥7%	−7.88	[9−]	
		$212m_2$	9 m	β^- ≤100%		[15−]	
		213	45.6 m	β^- 97.8%,α 2.2%	−5.243	(9/2−)	
		214	19.7 m	β^- 99+%, $\beta^-\alpha$ 0.0031%, α 0.021%	−1.209	(1−)	
		215	7 m	β^-	1.71		
84	Po	193	≤1 s	α	−8.31 s		
		194	0.6 s	α	−10.81 s	0+	
		195(g)	4.5 s	α	−11.06 s		
		195(m)	2.0 s	α			
		196	5 s	α	−13.21 s	0+	
		197	58 s	α 90%	−13.23 s		
		197m	26 s	α			
		198	1.78 m	α 70%,EC+β^+ 30%	−15.07 s	0+	
		199	5.2 m	EC+β^+ 88%,α 12%	−15.05 s	(3/2−)	
		199m	4.2 m	EC+β^+ 61%,α 39%		(13/2+)	
		200	11.4 m	EC+β^+ 86%,α 14%	−16.74 s	0+	
		201	15.2 m	EC+β^+ 98.4%,α 1.6%	−16.41 s	3/2(−)	
		201m	8.9 m	IT 53%,EC+β^+ 44%, α 2.9%	−15.98 s	(13/2+)	
		202	44 m	EC+β^+ 98.0%,α 2.0%	−17.79 s	0+	
		203	33 m	EC+β^+ 99.89%, α 0.11%	−17.36	5/2−	
		203m	1.2 m	IT 96%,EC+β^+ 4%	−16.72	(13/2+)	
		204	3.57 h	EC 99.4%,α 0.6%	−18.25 s	0+	
		205	1.80 h	EC+β^+ 99.5%,α 0.5%	−17.576	5/2−	
		206	8.8 d	EC 94.5%,α 5.5%	−18.190	0+	
		207	5.7 h	EC 99.5%,β^+ 0.5%, α 0.008%	−17.150	5/2−	
		207m	2.8 s	IT	−15.766	19/2−	
		208	2.90 y	α 99+%,EC 0.0018%	−17.475	0+	
		209	102 y	α 99.74%,EC 0.26%	−16.373	1/2−	
		210	138.38 d	α	−15.963	0+	<0.03$^{rs}_{g}$ <5×$10^{-4}$$^{rs}_{m}$ <0.002$_{a}$
		211	0.516 s	α	−12.444	(9/2+)	
		211m	25 s	α	−10.982	(25/2+)	
		212	0.30 μs	α	−10.381	0+	
		212m	45 s	α	−7.476	[16+]	
		213	4 μs	α	−6.663	9/2+	
		214	164 μs	α	−4.479	0+	
		215	1.78 ms	α 99+%,β^- 2.3×10^{-4}%	−0.540	(9/2)+	
		216	0.15 s	α	1.769	0+	
		217	<10 s	α	5.96 s		
		218	3.05 m	α 99+%,β^- 0.018%	8.355	0+	
85	At	196	0.3 s	α	−4.05 s		
		197	0.4 s	α	−6.03 s		
		198	4.9 s	α	−6.67		
		198m	1.5 s	α			
		199	7.2 s	α	−8.47		
		200(g)	42 s	α 53%,EC+β^+ 47%	−8.67 s		
		200(m)	4.3 s	α			
		201	1.5 m	α 71%,EC+β^+ 29%	−10.52 s		
		202	3.0 m	EC+β^+ 85%,α 15%	−10.52 s		
		203	7.3 m	EC+β^+ 69%,α 31%	−11.97 s		
		204	9.1 m	EC+β^+ 95.6%,α 4.4%	−11.97 s	(5+)	
		205	26 m	EC 87%,β^+ 3%,α 10%	−12.96 s	9/2−	
		206	31 m	EC 82%,β^+ 17%, α 1.0%	−12.73 s	(5+)	

Nuclide Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	$J\pi$	σ_n(b)
85	At	207	1.8 h	EC+β^+ ≈90%,α ≈10%	−13.31	9/2−	
		208	1.63 h	EC+β^+ 99.4%,α 0.6%	−12.64 s	(6+)	
		209	5.4 h	EC 95.9%,α 4.1%	−12.888	9/2−	
		210	8.3 h	EC+β^+ 99.82%, α 0.18%	−11.976	5+	
		211	7.21 h	EC 58.1%,α 41.9%	−11.653	9/2−	
		212	0.315 s	α	−8.625		
		212m	0.12 s	α	−8.403		
		213	0.11 μs	α,no γ	−6.589	9/2−	
		214	≈2 μs	α	−3.389		
		215	0.10 ms	α	−1.262	(9/2)−	
		216	0.30 ms	α	2.237	1(−)	
		217	32.3 ms	α 99+%,β^- 0.012%	4.382	(9/2−)	
		218	≈2 s	α 99.9%,β^- 0.1%	8.099		
		219	0.9 m	α ≈97%,β^- ≈3%	10.53		
86	Rn	200	1 s	α	−3.74 s	0+	
		201(g)	7.0 s	α	−3.95 s		
		201(m)	3.8 s	α			
		<202	<1 s?	α			
		202	9.9 s	α >70%	−5.88 s	0+	
		203	45 s	α 65%,EC+β^+ 35%	−6.00 s		
		203m	28 s	α	−≈5.95 s		
		204	75 s	α ≈72%,EC+β^+ ≈28%	−7.77 s	0+	
		205	170 s	EC+β^+ 77%,α 23%	−7.60 s		
		206	5.7 m	α 64%,EC+β^+ 36%	−8.97 s	0+	
		207	9.3 m	EC+β^+ 77%,α 23%	−8.69	5/2−	
		208	24 m	α 52%,EC+β^+ 48%	−9.56 s	0+	
		209	29 m	EC 80%,β^+ 3%,α 17%	−8.994	5/2−	
		210	2.4 h	α 96%,EC 4%	−9.608	0+	
		211	14.6 h	EC+β^+ 74%,α 26%	−8.761	1/2−	
		212	23 m	α	−8.666	0+	
		213	25.0 ms	α	−5.706	(9/2+)	
		214	0.27 μs	α	−4.328	0+	
		215	2.3 μs	α,no γ	−1.179	(9/2+)	
		216	45 μs	α	0.245	0+	
		217	0.54 ms	α	3.649	9/2+	
		218	35 ms	α	5.212	0+	
		219	3.96 s	α	8.831	(5/2)+	
		220	55.6 s	α	10.599	0+	<0.2 [rs]
		221	25 m	β^- ≈80%,α ≈20%	14.38 s		
		222	3.8235 d	α	16.370	0+	0.73 [rs]
		223	43 m	β^-			
		224	1.8 h	β^-	22.26 s	0+	
		225	4.5 m	β^-	27.59 s		
		226	6.0 m	β^-		0+	
87	Fr	203	0.7 s	α,β^++EC	1.23		
		204	2.1 s	α	0.92 s		
		205	3.7 s	α	−1.04 s		
		206	16.0 s	α 85%,EC+β^+ 15%	−1.18 s		
		207	14.8 s	α 93%,EC+β^+ 7%	−2.65 s	(9/2−)	
		208	58.0 s	α 74%,EC+β^+ 26%	−2.77 s		
		209	50.0 s	α 89%,EC+β^+ 11%	−3.76 s	9/2−	
		210	3.2 m	α,EC+β^+	−3.64 s		
		211	3.1 m	α,EC+β^+	−4.22		
		212	19.3 m	EC+β^+ 56%,α 44%	−3.69 s		
		213	34.7 s	α 99.45%,EC 0.55%	−3.556	(9/2−)	
		214	5.0 ms	α	−0.965	(1−)	
		214m	3.4 ms	α	−0.843	(9−)	
		215	0.12 μs	α,no γ	0.309	9/2−	
		216	0.70 μs	α,no γ	2.975		
		217	22 μs	α,no γ	4.307	9/2−	
		218	≈0.7 ms	α	7.050		
		219	0.020 s	α	8.617	(9/2)−	
		220	27.4 s	α 99.65%,β^- 0.35%	11.470		
		221	4.8 m	α	13.265	(5/2−)	
		222	14.4 m	β^- 99+%,α 0.01−0.1%	16.338		
		223	21.8 m	β^- 99+%,α ≈0.005%	18.382	(3/2)	
		224	2.7 m	β^-	21.71 s		
		225	3.9 m	β^-	23.79 s		
		226	48 s	β^-	27.46		

TABLE OF NUCLIDES

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
87	Fr	227	2.4 m	β^-	29.58		
		228	39 s	β^-			
		229	0.8 m	β^-			
88	Ra	206	0.4 s	α,(EC+β^+)?	3.96 s	0+	
		207	1.3 s	α,(EC+β^+)?	3.70 s		
		208	1.5 s	α	1.93 s	0+	
		209	4.7 s	α	1.97 s		
		210	3.7 s	α	0.61 s	0+	
		211	14 s	α,(EC+β^+)?	0.78	(5/2−)	
		212	13.0 s	α,(EC+β^+)?	−0.11 s	0+	
		213	2.7 m	α 80%,EC+β^+ 20%	0.290	(1/2−)	
		213m	2.1 ms	IT ≈99%,α ≈1%	2.060	(17/2−,13/2+)	
		214	2.46 s	α 99+%,EC 0.059%	0.090	0+	
		215	1.6 ms	α	2.531		
		216	0.18 μs	α	3.285	0+	
		217	1.6 μs	α	5.881		
		218	14 μs	α	6.644	0+	
		219	10 ms	α	9.377		
		220	23 ms	α	10.263	0+	
		221	30 s	α	12.957		
		222	38 s	α	14.312	0+	
		223	11.435 d	α	17.235	1/2+	34[rs]
		224	3.66 d	α	18.813	0+	12[rs]
		225	14.8 d	β^-	21.987	(3/2)+	
		226	1.60×10^3 y	α	23.666	0+	8
		227	42.2 m	β^-	27.185	(3/2+)	
		228	5.76 y	β^-	28.941	0+	36[ac]
		229	4.0 m	β^-	32.72 s		
		230	93 m	β^-	34.56 s	0+	
89	Ac	209	0.10 s	α	9.12 s		
		210	0.35 s	α	8.86 s		
		211	0.25 s	α,EC+β^+	7.40 s		
		212	0.93 s	α	7.18 s		
		213	0.80 s	α,no γ	6.17 s	(9/2−)	
		214	8.2 s	α ≥86%,EC ≤14%	6.14 s		
		215	0.17 s	α 99.91%, EC+β^+ 0.09%	5.95		
		216	≈0.33 ms	α	7.98 s		
		216m	0.33 ms	α	8.02 s		
		217	0.11 μs	α,no γ	8.701	(9/2−)	
		218	0.27 μs	α,no γ	10.837		
		219	7 μs	α,no γ	11.560	(9/2−)	
		220	26 ms	α	13.747		
		221	52 ms	α	14.518		
		222	5 s	α	16.617		
		222m	66 s	α ≥90%, IT <10%,EC ≈1%			
		223	2.2 m	α 99%,EC 1%	17.825	(5/2−)	
		224	2.9 h	EC ≈90%,α ≈10%	20.219		
		225	10.0 d	α	21.626	(3/2−)	
		226	29 h	β^- 83%,EC 17%, α 0.006%	24.301	(1−)	
		227	21.773 y	β^- 98.62%,α 1.38%	25.850	3/2−	900[ac]
		228	6.13 h	β^-	28.895	(3+)	
		229	62.7 m	β^-	30.72	(3/2+)	
		230	122 s	β^-	33.76 s		
		231	7.5 m	β^-	35.91	(1/2+)	
		232	35 s	[β^-]	39.15 s		
90	Th	215	1.2 s	α	10.87	(1/2−)	
		216	0.028 s	α	10.39 s	0+	
		217	0.25 ms	α	12.141		
		218	0.10 μs	α	12.362	0+	
		219	1.05 μs	α	14.470		
		220	10 μs	α	14.663	0+	
		221	1.7 ms	α	16.934		
		222	2.8 ms	α	17.197	0+	
		223	0.66 s	α	19.256		
		224	1.04 s	α	19.993	0+	

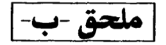
Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_a(b)
90	Th	225	8.0 m	α ≈90%,EC ≈10%	22.303	(3/2+)	
		226	30.9 m	α	23.189	0+	
		227	18.718 d	α	25.806	3/2+	200_f^{rs}
		228	1.9131 y	α	26.758	0+	100^{rs}
		229	7.3×10^3 y	α	29.581	5/2+	30_f
		230	8.0×10^4 y	α	30.861	0+	40
		231	25.52 h	β^-	33.812	5/2+	
		232	*100%* 1.41×10^{10} y	α	35.447	0+	7.4
		233	22.3 m	β^-	38.732	1/2+	1.4×10^3 sc
		234	24.10 d	β^-	40.612	0+	2.0
		235	6.9 m	β^-	44.15 s		
		236	37 m	β^-	46.64 s	0+	
91	Pa	216	0.20 s	α			
		217	≈10 ms	α			
		222	5.7 ms	α	21.959		
		223	6 ms	α	22.330		
		224	0.9 s	α	23.798		
		225	1.8 s	α	24.320		
		226	1.8 m	α 74%,EC 26%	26.029		
		227	38.3 m	α ≈85%,EC ≈15%	26.832	(5/2-)	
		228	22 h	EC ≈98%,α ≈2%	28.870	3+	
		229	1.4 d	EC 99.75%,α 0.25%	29.887	(5/2+)	
		230	17.7 d	EC 90%,β^- 10%, α 0.0032%	32.166	(2−)	$1.5\times10^3{}_f^{rs}$
		231	3.28×10^4 y	α	33.423	3/2−	200
		232	1.31 d	β^-	35.934	(2−)	800^{rs} 700_f^{rs}
		233	27.0 d	β^-	37.487	3/2−	20_m 19_g
		234	6.75 h	β^-	40.349	4(+)	$<5\times10^3{}_f^{rs}$
		234m	1.175 m	β^- 99.87%,IT 0.13%	≈40.43	(0−)	$<500_f^{rs}$
		235	24.2 m	β^-	42.32	(3/2−)	
		236	9.1 m	β^-	45.54	(1−)	
		237	8.7 m	β^-	47.64	(1/2+)	
		238	2.3 m	β^-	51.27	(3−)	
92	U	226	0.5 s	α	27.186	0+	
		227	1.1 m	α	28.88 s		
		228	9.1 m	α ≥95%,EC ≤5%	29.221	0+	
		229	58 m	EC ≈80%,α ≈20%	31.201	(3/2+)	
		230	20.8 d	α	31.607	0+	20_f^{rs}
		231	4.2 d	EC 99+%,α 0.0055%	33.78	(5/2)	$≈300_f^{rs}$
		232	72 y	α	34.597	0+	74 76_f
		233	1.592×10^5 y	α	36.915	5/2+	530_f 46
		234	*0.0054%* 2.45×10^5 y	α	38.143	0+	100_{g+m}
		235	*0.720%* 7.038×10^8 y	α	40.916	7/2−	580_f 98
		235m	26 m	IT	40.916	1/2+	
		235f	20 ns?	SF			
		236	2.342×10^7 y	α	42.442	0+	5.1
		236f	0.12 μs	SF	44.79		
		237	6.75 d	β^-	45.389	1/2+	400
		238	*99.275%* 4.468×10^9 y	α	47.307	0+	2.7
		238f	0.19 μs	IT ≈96%,SF ≈4%	49.866	(0+)	
		239	23.5 m	β^-	50.572	5/2+	22^{rs} 15_f^{rs}
		240	14.1 h	β^-	52.712	0+	
93	Np	229	4.0 m	α ≥50%,EC ≤50%	33.758		
		230	4.6 m	α 99+%,EC+β^+ ≤0.97%	35.232		
		231	48.8 m	EC <99%,α >1%	35.626	(5/2)	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
93	Np	232	14.7 m	EC	37.29 s		
		233	36.2 m	EC 99+%, α ≈0.001%	38.01 s	(5/2+)	
		234	4.4 d	EC 99.95%, β^+ 0.05%	39.951	(0+)	$1.0\times10^{3}{}^{rs}_{f}$
		235	396 d	EC 99+%, α 0.0016%	41.040	5/2+	$160^{18}_{22.5}$ n
		236	1.1×10^{5} y	EC 91%, β^- 9%		(6−)	$3\times10^{3}{}_{f}$
		236	22.5 h	EC 50%, β^- 50%	43.426	1(−)	
		237	2.14×10^{6} y	α	44.869	5/2+	180
		237f	45 ns	SF	47.57		
		238	2.117 d	β^-	47.453	2+	$2.1\times10^{3}{}^{rs}_{f}$
		239	2.35 d	β^-	49.306	5/2+	32^{rs}_{m} $\approx20^{rs}_{g}$
		240	67 m	β^-	52.21	(5+)	
		240m	7.5 m	β^- 99.89%, IT 0.11%		1(−)	
		241	16.0 m	β^-	54.31		
94	Pu	232	34 m	EC ≥80%, α ≤20%	38.362	0+	
		233	20.9 m	EC 99.88%, α 0.12%	40.042		
		234	8.8 h	EC 94%, α 6%	40.342	0+	
		235	25.6 m	EC 99+%, α 0.003%	42.16	(5/2)+	
		235f	30 ns	SF	43.86		
		236	2.85 y	α	42.889	0+	150^{rs}_{f}
		$236f_1$	0.03 ns	SF			
		$236f_2$	0.03 μs	SF	46.39		
		237	45.4 d	EC 99+%, α 0.0033%	45.087	7/2−	$2.1\times10^{3}{}^{rs}_{f}$
		237m	0.18 s	IT	45.233	1/2+	
		$237f_1$	0.11 μs	SF	47.39		
		$237f_2$	1.1 μs	SF	47.69		
		238	87.74 y	α	46.161	0+	500^{rs} 17^{rs}_{f}
		$238f_1$	0.6 ns	SF	48.56		
		$238f_2$	6 ns	SF	49.86		
		239	2.41×10^{4} y	α	48.585	1/2+	742_{f} 271
		$239f_1$	8 μs	SF	50.79		
		$239f_2$	0.01 μs?	SF			
		240	6.57×10^{3} y	α	50.123	0+	290
		240f	3.8 ns	SF	52.52	(0+)	
		241	14.4 y	β^- 99+%, α 0.0024%	52.953	5/2+	$1.01\times10^{3}{}_{f}$ 370
		$241f_1$	24 μs	SF	54.95		
		$241f_2$	30 ns?	SF			
		242	3.76×10^{5} y	α	54.715	0+	19 $<0.2_{f}$
		$242f_1$	4 ns	SF			
		$242f_2$	28 ns	SF			
		243	4.956 h	β^-	57.752	7/2+	200^{rs}_{f} 100^{rs}
		243f	0.05 μs	SF	59.55		
		244	8.1×10^{7} y	α	59.803	0+	1.7
		244f	0.4 ns	SF			
		245	10.5 h	β^-	63.157	(9/2−)	150
		246	10.85 d	β^-	65.29	0+	
95	Am	232	1.4 m?	[EC+β^+], (EC+β^+)SF			
		234	2.6 m	[EC+β^+], (EC+β^+)SF	44.46 s		
		235f	?	SF			
		236f	?	SF			
		237	1.22 h	EC 99+%, α 0.025%	46.64 s	5/2(−)	
		237f	5 ns	SF	48.74 s		
		238	1.63 h	EC 99+%, α 1.0×10^{-4}%	48.417	1+	
		238f	35 μs	SF	50.72		
		239	11.9 h	EC 99+%, α 0.010%	49.389	5/2−	
		239f	0.16 μs	SF	51.89		
		240	50.8 h	EC 99+%, α 1.9×10^{-4}%	51.443	(3−)	
		240f	0.9 ms	SF	54.04		

Nuclide Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
95	Am	241	433 y	α	52.932	5/2−	562_g 62_m 3.2_f
		241f	1.5 μs	SF	55.13		
		242	16.01 h	β^- 82.7%,EC 17.3%	55.463	1−	$2.1\times10^3{}^{rs}_f$
		242m	152 y	IT 99.52%,α 0.48%	55.511	5−	$7.4\times10^3{}^{rs}_f$ $1.6\times10^3{}^{rs}$
		242f	14.0 ms	SF	57.76		
		243	7.37×10^3 y	α	57.170	5/2−	80^{rs}_m 6^{rs}_g
		243f	5 μs	SF	59.17		
		244	10.1 h	β^-	59.877	(6−)	$2.2\times10^3{}^{rs}_f$
		244m	26 m	β^- 99+%,EC 0.036%	59.948	(1−)	$1.6\times10^3{}^{rs}_f$
		244f	1.1 ms	SF	61.48		
		245	2.05 h	β^-	61.897	(5/2)+	
		245f	0.6 μs	SF			
		246	39 m	β^-		(7−)	
		246	25.0 m	β^-	64.92	(2−)	
		246f	0.07 ms	SF			
		247	24 m	β^-	67.13 s	(5/2)	
96	Cm	238	2.3 h	EC <90%,α >10%	49.398	0+	
		239	2.9 h	EC	51.09 s		
		240	27 d	α	51.712	0+	
		240f	10 ps	SF			
		241	32.8 d	EC 99.0%,α 1 0%	53.696	1/2+	
		241f	15 ns	SF	55.70		
		242	162.8 d	α	54.802	0+	20 $<5^{rs}_f$
		$242f_1$	0.04 ns	SF			
		$242f_2$	0.2 μs	SF	57.60		
		243	28.5 y	α 99.74%,EC 0.26%	57.177	5/2+	$1.0\times10^3{}^{rs}_a$ 610_f 130
		243f	0.04 μs	SF	58.68		
		244	18.11 y	α	58.450	0+	14 1.0_f
		$244(f_1)$	<5 ps?	[SF]			
		$244(f_2)$	>100 ns	SF	61.45		
		245	8.5×10^3 y	α	61.001	7/2+	$2.0\times10^3{}_f$ 350
		245f	13 ns	SF	62.70		
		246	4.7×10^3 y	α	62.616	0+	1.3 0.2_f
		247	1.6×10^7 y	α	65.530	9/2−	100^{r}_f 60
		248	3.5×10^5 y	α 91.74%,SF 8.26%	67.389	0+	4^{rc} 0.3_f
		249	65 m	β^-	70.748	1/2+	2^{rs}
		250	$\lesssim1.1\times10^4$ y	SF	72.986	0+	$\approx80^{rs}$
		251	16.8 m	β^-	76.67 s	(1/2+)	
97	Bk	240	5 m	EC+β^+, (EC+β^+)SF 0.001%	55.71 s		
		242	7 m	EC	57.80 s		
		$242f_1$	0.6 μs	SF			
		$242f_2$	10 ns	SF			
		243	4.5 h	EC 99.85%,α 0.15%	58.685	(3/2−)	
		243f	5 ns	SF	60.88		
		244	4.4 h	EC 99+%,α 0.006%	60.646		
		244f	0.8 μs	SF			
		245	4.90 d	EC 99.88%,α 0.12%	61.811	3/2−	
		245f	2 ns	SF			
		246	1.80 d	EC	64.02 s	(2−)	
		247	1.4×10^3 y	α	65.484	(3/2−)	

Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
97	Bk	248	23.5 h	β^- 70%,EC 30%	67.99 s	(1−)	
		248	>9 y	?	67.99 s	(6+)	
		249	0.88 y	β^- 99+%,α 0.0015%	69.848	7/2+	$1.0\times10^{3}{}^{rs}_{\alpha}$
		250	3.22 h	β^-	72.950	2−	$1.0\times10^{3}{}^{rs}_{f}$
		251	56 m	β^-	75.25 s	(3/2−)	
98	Cf	240	1.1 m	α	58.03 s	0+	
		241	4 m	α	59.19 s		
		242	3.5 m	α	59.332	0+	
		243	11 m	[EC] ≈86%,α ≈14%	60.91 s		
		244	19 m	α	61.465	0+	
		245	44 m	EC ≈70%,α ≈30%	63.377		
		246	35.7 h	α	64.096	0+	
		246f	0.05 μs	SF			
		247	3.15 h	EC 99.96%,α 0.04%	66.15 s	(7/2+)	
		248	333 d	α	67.243	0+	
		249	351 y	α	69.722	9/2−	$1.63\times10^{3}{}_{f}$ 480^{sc}
		250	13.1 y	α	71.170	0+	$2.0\times10^{3}{}^{sc}$ $<350^{rs}_{f}$
		251	9.0×10^{2} y	α	74.127	1/2+	$4\times10^{3}{}^{sc}_{f}$ $2.9\times10^{3}{}^{sc}$
		252	2.64 y	α 96.91%,SF 3.09%	76.031	0+	32^{sc}_{f} 20
		253	17.8 d	β^- 99.69%,α 0.31%	79.299	(7/2+)	$1.3\times10^{3}{}^{rs}_{f}$
		254	60.5 d	SF 99.69%,α 0.31%	81.342	0+	100^{rs}_{α}
		255	≈2 h?	[β^-]			
		256	12 m	SF		0+	
99	Es	243	21 s	α	64.80 s		
		244	37 s	EC+β^+ 96%,α 4%	65.97 s		
		245	1.3 m	EC 60%,α 40%	66.38 s		
		246	7.7 m	EC+β^+ 90%,α 10%	67.93 s		
		247	4.7 m	EC ≈93%,α ≈7%	68.550		
		248	28 m	EC ≈99.7%,α ≈0.3%	70.22 s		
		249	1.70 h	EC 99.4%,α 0.6%	71.116	(7/2+)	
		250	8.6 h	EC	73.17 s	(6+)	
		250	2.1 h	EC	73.17 s	(1−)	
		251	33 h	EC 99.5%,α 0.5%	74.507	(3/2−)	
		252	472 d	α 78%,EC 22%	77.15 s	(5−)	
		253	20.47 d	α	79.012	7/2+	160_{m} $<3_{g}$ $<60^{rs}_{f}$
		254	276 d	α	81.992	(7+)	$2.8\times10^{3}{}_{f}$
		254m	39.3 h	β^- 99.59%, α 0.33%,EC 0.08%	82.070	2+	$1.8\times10^{3}{}^{rs}_{f}$
		255	38.3 d	β^- 92.0%,α 8.0%, SF 0.004%	84.12 s	(7/2+)	65^{rs}
		256	7.6 h	β^-	87.26 s	(7,8)	
		256	22 m	β^-	87.26 s		
100	Fm	242	0.8 ms?	SF		0+	
		244	3.3 ms	SF	68.77 s	0+	
		245	4 s	α	70.02 s		
		246	1.2 s	α 92%,SF 8%	70.131	0+	
		247	9 s	α	71.54 s		
		247	35 s	α ≥50%,EC ≤50%	71.54 s		
		248	36 s	α 99.9%,SF 0.1%	71.891	0+	
		249	3 m	α	73.50 s		
		250	30 m	α,EC?	74.069	0+	
		250m	1.8 s	IT			
		251	5.3 h	EC 98.2%,α 1.8%	76.00 s	(9/2−)	
		252	25.4 h	α	76.822	0+	
		253	3.0 d	EC 88%,α 12%	79.346	1/2+	
		254	3.240 h	α 99+%,SF 0.0590%	80.899	0+	
		255	20.1 h	α	83.793	7/2+	$3.3\times10^{3}{}^{sc}_{f}$

Nuclide Z	El	A	Abundance or $t_{1/2}$	Decay Mode	Δ(MeV)	Jπ	σ_n(b)
100	Fm	256	2.63 h	SF 91.9%,α 8.1%	85.481	0+	
		257	100.5 d	α 99.79%,SF 0.21%	88.588	(9/2+)	6×10^3 α 3.0×10^3 f
		258	0.4 ms	SF		0+	
		259	1.5 s	SF			
101	Md	248	7 s	EC+β^+ 80%,α 20%	77.00 s		
		249	24 s	EC+β^+ ≤80%,α ≳20%	77.26 s		
		250	0.9 m	EC+β^+ 94%,α 6%	78.60 s		
		251	4.0 m	EC ≳90%,α ≤10%	79.03 s		
		252	2 m	EC+β^+	80.50 s		
		254	10 m	EC	83.39 s		
		254	28 m	EC	83.39 s		
		255	27 m	EC 92%,α 8%	84.843	(7/2−)	
		256	75 m	EC 90.1%,α 9.9%	87.42 s		
		257	5.0 h	EC 90%,α 10%	89.04 s	(7/2−)	
		258	56 d	α	91.82 s		
		258	43 m	EC(?)	91.82 s		
		259	1.6 h	SF			
102	No	250	0.25 ms?	SF		0+	
		251	0.8 s	α			
		252	2.3 s	α 73%,SF 27%	82.867	0+	
		253	1.7 m	α	84.33 s		
		254	55 s	α	84.729	0+	
		254m	0.28 s	IT			
		255	3.1 m	α 62%,EC 38%	86.87 s	(1/2+)	
		256	3.2 s	α ≈99.7%,SF ≈0.3%	87.801	0+	
		257	26 s	α	90.223		
		258	1.2 ms	SF	91.52 s	0+	
		259	58 m	α ≈78%,EC ≈22%	94.012		
103	Lr	255	22 s	α	90.25 s		
		256	27 s	α	91.82 s		
		257	0.65 s	α	92.97 s		
		258	4.3 s	α	94.82 s		
		259	5 s	α	95.97 s		
		260	3.0 m	α	98.14 s		
104		253	1.8 s?	SF ≈50%(?)			
		254	0.5 ms?	SF		0+	
		255	2 s?	SF ≈50%			
		256	≈5 ms?	SF		0+	
		257	5 s	α	95.95 s		
		258	11 ms?	SF	96.55 s	0+	
		259	3 s	α	98.50 s		
		260	0.08 s?	SF	99.23 s	0+	
		261	1.1 m	α	101.25 s		
105		255	≈1.2 s?	SF ≈20%			
		257	5 s?	SF ≈20%			
		260	1.5 s	α 90%,SF 10%	103.65 s		
		261	2 s	α ≈75%,SF ≈25%	104.46 s		
		262	0.7 m	α ≈40%, SF or EC(?) ≈60%	106.04 s		
106		259	4 to 10 ms?	SF ≈70%(?)			
		263	0.9 s	α			
107		261	1 to 2 ms?	SF ≈20%			



APPENDIX N

Chart of the Nuclides

On the following pages the *Karlsruher Nuklidkarte* (by W. Seelmann-Eggebert, G. Pfennig and H. Münzel is reproduced by the kind permission of Prof. Seelmann-Eggebert. The chart shows Z on the ordinate and N on the abscissa. The axes are thus interchanged when compared with Fig. 3.1 (but same as for Fig. 3.8). In the original chart colors are used to make it easy to distinguish between different decay modes.

The following abbreviations and symbols are used:

µs; ms, s	Mikrosekunde, Millisekunde, Sekunde microsecond, millisecond, second
m; h; d, a	Minute, Stunde, Tag, Jahr minute, hour, day, year
Iγ	Isomerenübergang isomeric transition
sf	Spontanspaltung spontaneous fission
e⁻	Konversionselektronen conversion electrons
p	Zerfall durch Protonen-Emission decay by proton emission
(n), (p), (α)	n-, p- oder α-Emission nach einem β-Übergang n, p or α emission following β decay
m, g	Nuklid zerfällt in den metastabilen und/oder Grundzustand des Tochternuklids nuclide decays to the metastable and/or ground state of the daughter nuclide
σf, σ	Spalt- und (n, γ)-Querschnitt für thermische Neutronen (b) fission- and (n,γ)-cross section for thermal neutrons (b)

Element

Cd	symbol of the element
112,40	atomic weight
σ 2450	absorption cross section for thermal neutrons (b)

Unstable Nuclides

Ge 81	symbol of the element, number of nucleons
10,1 s	half-life
β⁻ 5,3, – 5,6 γ 336 198	β⁻-energies in MeV, γ-energies in keV
0,21	isobaric yield for ^{235}U fission with thermal neutrons (%)

Sr 85	symbol of the element, number of nucleons
67,7 m | 64,8 d Iγ 232 | ε ε | no β⁻ γ 151 | γ 514	left hand side: metastable state right hand side: ground state

Am 240 sf | 50,8 h ε α 5,378 ... γ 988, 889 g	left hand side: spontaneous fission isomer T < 0,1 s right hand side: decay data of the ground state, "g" indicates that the daughter ^{240g}Pu is formed to at least 95% and ^{240m}Pu to at most 5%

Stable Nuclide

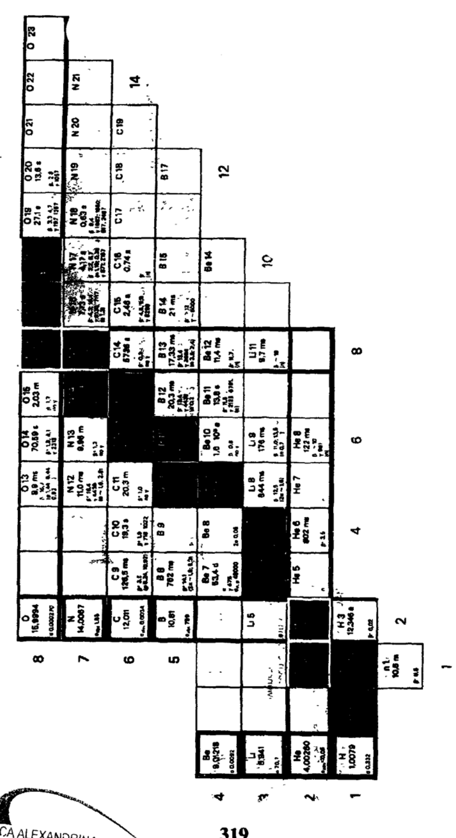
	symbol of the element, number of nucleons
	isotopic abundance (atom %)
	(n, γ) cross sections for the formation of ^{127m}Te and of ^{127g}Te (b)

Nuclide with Metastable State

	left part: metastable state right part: ground state
17,5 s	
Iγ 162	energy of the isomeric transition (keV)
	(n,γ) cross section (b)

Primordial Nuclide

	symbol of the element, number of nucleons
6,1 · 10¹¹ a α 3,17 σ 150	isotopic abundance (atom %)



O 23
O 22
O 21
O 20 13,6 s
N 21
N 20
N 19
C 19
C 18
B 17
O 19 27,1 s
N 18 0,63 s
C 17
N 17 4,17 s
C 16 0,74 s
B 15
Be 14
C 15 2,46 s
B 14 21 ms
C 14 5736 a
B 13 17,33 ms
Be 12 11,4 ms
Li 11 8,7 ms
O 15 2,03 m
B 12 20,3 ms
Be 11 13,8 s
O 14 70,59 s
N 13 9,96 m
Be 10
Li 9 178 ms
He 8 122 ms
O 13 8,9 ms
N 12 11,0 ms
C 11 20,3 m
Li 8 844 ms
He 7
C 10 19,3 s
B 9
Be 8
He 6 802 ms
C 9 126,5 ms
B 8 762 ms
Be 7 53,4 d
He 5
O 15,9994
N 14,0067
C 12,011
B 10,81
Li 5
H 3 12,346 a
n 1 10,6 m
Be 9,01218
Li 6,941
He 4,00260
H 1,0079
8
7
6
5
4
3
2
1
14
12
10
8
6
4
2
1

KARLSRUHER NUKLIDKARTE 4. Auflage 1974

CHART OF THE NUCLIDES – TABLEAU DES NUCLEIDES – TABLA DE NUCLIDOS

W. Seelmann-Eggebert, G. Pfennig, H. Münzel
Kernforschungszentrum Karlsruhe
Institut für Radiochemie

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

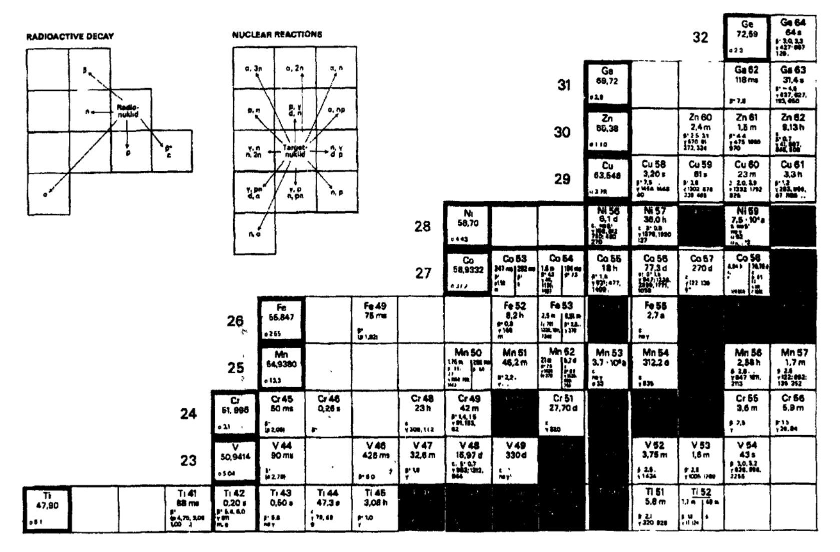
Zu beziehen von: / For sale by: / En vente chez: / Puede adquirirse en: Gersbach u. Sohn Verlag, 8 München 34, Barer Str. 32
ISBN 3 87253 084 4

Gedruckt von: / Printed by: / Imprimé par: / Impreso por: Ernst Klett Druckerei, 7 Stuttgart 1

Z											
18										Ar 39,948	Ar 33 173 ms
17										Cl 35,453	Cl 32 291 ms
16						S 32,06			S 29 187 ms	S 30 1,22 s	S 31 2,61 s
15						P 30,97376			P 28 268 ms	P 29 4,2 s	P 30 2,50 m
14						Si 28,086	Si 25 218 ms	Si 26 2,2 s	Si 27 4,7 s		
13					Al 26,98154	Al 23 470 ms	Al 24	Al 25 7,2 s	Al 26		Al 28 2,246 m
12	Mg 24,305			Mg 20 ? 0,62 s	Mg 21 122,5 ms	Mg 22 3,86 s	Mg 23 12,0 s				Mg 27 9,46 m
11	Na 22,98977				Na 20 446 ms	Na 21 22,8 s	Na 22 2,60 a		Na 24	Na 25 59,6 s	Na 26 1,08 s
10	Ne 20,179		Ne 17 109 ms	Ne 18 1,67 s	Ne 19 17,4 s				Ne 23 38 s	Ne 24 3,38 m	Ne 25 602 ms
9	F 18,99840			F 17 64,5 s	F 18 109,7 m		F 20 11,0 s	F 21 4,4 s	F 22 4,23 s	F 23 2,23 s	F 24

	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Sc	Sc 44,9559			Sc 40 183 ms	Sc 41 596 ms	Sc 42	Sc 43 3,89 h	Sc 44		Sc 46	Sc 47 3,42 d	Sc 48 43,67 h	Sc 49 57,2 m	Sc 50 1,7 m	Sc 51 12 s	
Ca	Ca 40,08	Ca 37 175 ms	Ca 38 439 ms	Ca 39 860 ms		Ca 41 1,3 · 10⁵ a				Ca 45 163 d		Ca 47 4,54 d		Ca 49 8,72 m	Ca 50 13,9 s	
K	K 39,098	K 36 341 ms	K 37 1,22 s	K 38				K 42 12,36 h	K 43 22,2 h	K 44 22,2 m	K 45 16,3 m	K 46 115 s	K 47 17,5 s	K 48 ~9 s	K 49	K 50
Ar	Ar 34 839 ms	Ar 35 1,78 s		Ar 37 35,1 d		Ar 39 269 a		Ar 41 1,83 h	Ar 42 33 a	Ar 43 5,4 m	Ar 44 11,9 m					
Cl	Cl 33 2,47 s	Cl 34		Cl 36 3,0 · 10⁵ a		Cl 38 37,18 m	Cl 39 56 m	Cl 40 1,35 m	Cl 41 34 s	Cl 42						
S				S 35 87,5 d		S 37 5,1 m	S 38 2,83 h	S 39	S 40							
P		P 32 14,3 d	P 33 25,3 d	P 34 12,4 s	P 35 47,4 s	P 36	P 37	P 38								
Si		Si 31 2,62 h	Si 32 280 a	Si 33 6,18 s	Si 34	Si 35	Si 36									
Al	Al 29 6,6 m	Al 30 3,3 s	Al 31 644 ms	Al 32	Al 33											
Mg	Mg 28 21,1 h	Mg 29 1,49 s	Mg 30 0,85 s	Mg 31												
Na	Na 27 285 ms	Na 28 35,7 ms	Na 29 48,6 ms	Na 30 55 ms	Na 31 17,7 ms	Na 32 14,5 ms	Na 33 20 ms									

16 18 20 22 24 26 28 30 32

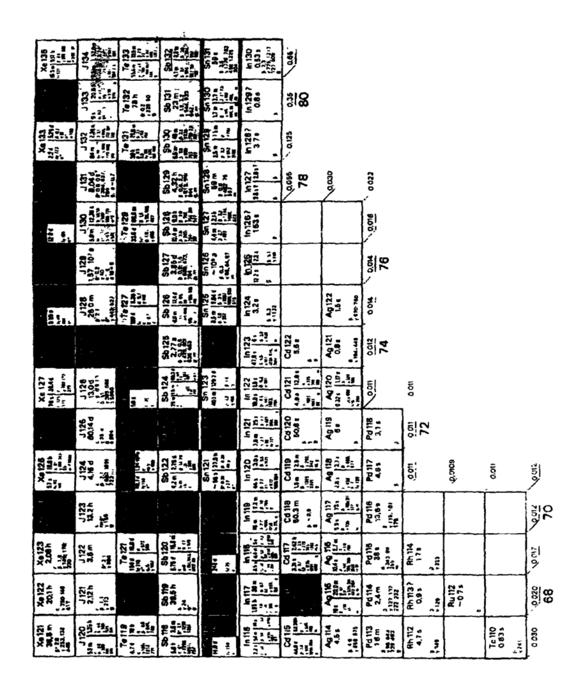

RADIOACTIVE DECAY
Radio-nuklid
NUCLEAR REACTIONS
Target-nuklid
32
Ge 72,59
Ga 64 64 s
31
Ga 69,72
Ga 62 118 ms
Ga 63 31,4 s
30
Zn 65,38
Zn 60 2,4 m
Zn 61 1,5 m
Zn 62 9,13 h
29
Cu 63,546
Cu 58 3,20 s
Cu 59 81 s
Cu 60 23 m
Cu 61 3,3 h
28
Ni 58,70
Ni 56 6,1 d
Ni 57 36,0 h
Ni 59 7,5 · 10⁴ a
27
Co 58,9332
Co 53
Co 54
Co 55 18 h
Co 56 77,3 d
Co 57 270 d
Co 58
26
Fe 55,847
Fe 49 75 ms
Fe 52 8,2 h
Fe 53
Fe 55 2,7 a
25
Mn 54,9380
Mn 50
Mn 51 46,2 m
Mn 52
Mn 53 3,7 · 10⁶ a
Mn 54 312,2 d
Mn 56 2,58 h
Mn 57 1,7 m
24
Cr 51,996
Cr 45 50 ms
Cr 46 0,26 s
Cr 48 23 h
Cr 49 42 m
Cr 51 27,70 d
Cr 55 3,6 m
Cr 56 5,9 m
23
V 50,9414
V 44 90 ms
V 46 426 ms
V 47 32,6 m
V 48 15,97 d
V 49 330 d
V 52 3,75 m
V 53 1,6 m
V 54 43 s
Ti 47,90
Ti 41 88 ms
Ti 42 0,20 s
Ti 43 0,50 s
Ti 44 47,3 a
Ti 45 3,08 h
Ti 51 5,8 m
Ti 52

34	Se 78,96	Se 68	Se 70 36,8 m	Se 71 4,8 m	Se 72 8,5 d	Se 73	(stable)	Se 75 120 d	(stable)	17,5 s	(stable)	Se 79	(stable)	Se 81	(stable)	Se 83
33	As 74,9216	As 68 2,7 m	As 69 15 m	As 70 53 m	As 71 64 h	As 72 26,0 h	As 73 80,3 d	As 74 17,7 d	(stable)	As 76 26,4 h	As 77 38,8 h	As 78 1,5 h	As 79	As 80 15,2 s	As 81	As 82
Ge 65 31 s	Ge 66 2,3 h	Ge 67 18,7 m	Ge 68 287 d	Ge 69 39 h	(stable)	Ge 71 11,2 d	(stable)	(stable)	(stable)	Ge 75	(stable)	Ge 77	Ge 78 88 m	Ge 79	Ge 80 24,5 s	Ge 81 10,1 s
Ga 64 2,6 m	Ga 65 15 m	Ga 66 9,3 h	Ga 67 78,3 h	Ga 68 68,3 m	(stable)	Ga 70 21,1 m	(stable)	Ga 72 14,1 h	Ga 73 4,8 h	Ga 74 8,3 m	Ga 75 2,1 m	Ga 76 27,1 s	Ga 77 13 s	Ga 78 5,1 s	Ga 79 2,9 s	Ga 80 1,7 s
Zn 63 38,4 m	(stable)	Zn 65 244 d	(stable)	(stable)	(stable)	Zn 69	(stable)	Zn 71	Zn 72 46,5 h	Zn 73 23,5 s	Zn 74 96 s	Zn 75 10,2 s	Zn 76 5,7 s	Zn 77 1,4 s	0,020 48	0,056 0,12
Cu 62 9,76 m	(stable)	Cu 64 12,70 h	(stable)	Cu 66 5,1 m	Cu 67 61,9 h	Cu 68	Cu 69 3,0 m	Cu 70			0,00010 44	0,00035	0,0012 46	0,0036	0,0082	
(stable)	(stable)	Ni 63 100 a	(stable)	Ni 65 2,52 h	Ni 66 54,6 h	Ni 67 18 s										
Co 60	Co 61 1,6 h	Co 62	Co 63 27,5 s	Co 64 0,4 s			40		42							
Fe 59 44,6 d	Fe 60 ~10^5 a	Fe 61 6,0 m														
Mn 58			36		38											
	34															

													45	Rh 102,9055 σ 145	Rh 94 ~25 s | ~80 s
												44	Ru 101,07 σ 2,56		Ru 92 3,2 m	Ru 93 10,8 s | 58 s
											43	Tc			Tc 91 3,2 m	Tc 92 4,4 m
											42	Mo 95,94 σ 2,65	Mo 88 8,2 m		Mo 90 5,7 h	Mo 91 65 s | 15,5 m
										41	Nb 92,9064 σ 1,15	Nb 86 1,4 m	Nb 87 3,9 m | 2,6 m	Nb 88 7,8 m | 14,3 m	Nb 89 66 m | 1,9 h	Nb 90 18,8 s | 14,6 h
						40	Zr 91,22 σ 0,185	Zr 81 ~10 m	Zr 82 9,5 m	Zr 83 5–10 m	Zr 84 5,0 m	Zr 85 8 m | 14 h	Zr 86 16,5 h	Zr 87 14,0 s | 1,6 h	Zr 88 83,4 d	Zr 89 4,18 m | 78,4 h
						39	Y 88,9059 σ 1,28				Y 83 2,88 m | 7,1 m	Y 84	Y 85 2,7 h | 4,9 h	Y 86 48 m | 14,74 h	Y 87 13 h | 80,3 h	Y 88 106 d
					38	Sr 87,62 σ 1,21	Sr 78 30,6 m	Sr 79 8,1 m	Sr 80 1,6 h	Sr 81 25 m	Sr 82 25 d	Sr 83 5,0 s | 33 h		Sr 85 67,7 m | 64,8 d		2,8 h
			37	Rb 85,4678 σ 0,37	Rb 76 21 s	Rb 76 36,8 s	Rb 77 3,9 m	Rb 78 5,8 m | 17,7 m	Rb 79 23,0 m	Rb 80 30 s	Rb 81 32 m | 4,58 h	Rb 82 6,3 h | 1,3 m	Rb 83 86,2 d	Rb 84 21 m | 34,5 d		Rb 86 1,02 m | 18,7 d
36	Kr 83,80 σ 25,0	Kr 72 17 s	Kr 73 28 s	Kr 74 15 m	Kr 75 4,5 m	Kr 76 14,8 h	Kr 77 1,24 h		Kr 79 50 s | 34,5 h		Kr 81 13,1 s		1,83 h		Kr 85 4,48 h | 10,76 a
35	Br 79,904 σ 6,8		Br 72 1,3 m	Br 73 3,3 m	Br 74 25 m | 42 m	Br 75 1,6 h	Br 76 16,0 h	Br 77 4,2 m | 58 h	Br 78 6,46 m	4,8 s	Br 80 4,42 h | 17,6 m		Br 82 6,1 m | 35,34 h	Br 83 2,40 h	Br 84 6,0 m | 31,8 m

Tc 93	Tc 94	Tc 95	Tc 96	Tc 97	Tc 98 4,2·10⁶ a	Tc 99	Tc 100 15,8 s	Tc 101 14 m	Tc 102	Tc 103 50 s	Tc 104 18,0 m	Tc 105 7,8 m	Tc 106 36 s	Tc 107 21 s	Tc 108 5,0 s	Tc 109 ~1 s
	Mo 93						Mo 99 66,0 h		Mo 101 14,6 m	Mo 102 11,5 m	Mo 103 62 s	Mo 104 1,1 m	Mo 105 42 s	Mo 106 10 s	Mo 107 ~5 s	Mo 108 1,5 s
Nb 91	Nb 92	13,6 s	Nb 94	Nb 95	Nb 96 23,4 h	Nb 97	Nb 98	Nb 99	Nb 100	Nb 101 7,1 s	Nb 102		Nb 104			0,17 66 0,070
			Zr 93 1,5·10⁶ a		Zr 95 64,0 d		Zr 97 16,8 h	Zr 98 30,7 s	Zr 99 2,35 s	Zr 100 7,1 s	Zr 101 2,0 s	Zr 102 2,9 s				0,390
16,1 s	Y 90	Y 91	Y 92 3,54 h	Y 93 10,1 h	Y 94 19 m	Y 95 10,3 m	Y 96 9,3 s	Y 97 1,1 s	Y 98 1,0 s	Y 99 1,4 s	Y 100 0,5 s		4,19	3,12 64	1,33	0,927
	Sr 89 50,5 d	Sr 90 28,5 a	Sr 91 9,5 h	Sr 92 2,71 h	Sr 93 7,48 m	Sr 94 74 s	Sr 95 24,4 s	Sr 96 1,0 s	Sr 97 <200 ms	Sr 98 0,8 s			5,05			
	Rb 88 17,8 m	Rb 89 15,2 m	Rb 90	Rb 91 58 s	Rb 92 4,5 s	Rb 93 5,8 s	Rb 94 2,69 s	Rb 95 383 ms	Rb 96 207 ms	Rb 97 176 ms	Rb 98 106 ms	Rb 99 76 ms	6,30			
	Kr 87 76,3 m	Kr 88 2,80 h	Kr 89 3,18 m	Kr 90 32,3 s	Kr 91 8,6 s	Kr 92 1,84 s	Kr 93 1,29 s	Kr 94 0,20 s	Kr 95 <0,5 s		6,03	5,79 62	6,13			
Br 85 2,87 m	Br 86	Br 87 55,7 s	Br 88 16,2 s	Br 89 4,5 s	Br 90 1,63 s	Br 91 0,64 s	Br 92 0,25 s			6,50 60	6,28					
Se 84 3,1 m	Se 85 33 s	Se 86 15,1 s	Se 87 5,60 s	Se 88 1,5 s	Se 89 0,4 s	5,89 56	5,93	5,97 58	6,40	6,44						
As 83 13,3 s	As 84	As 85 2,05 s	As 86 0,9 s	As 87 ~0,3 s	3,62	4,80										
Ge 82 4,6 s	Ge 83 1,9 s	Ge 84 1,2 s	1,32	1,86 54												
0,21 50	0,74	0,533 52	0,986													

										56		Ba 137.34	Ba 119 5.4 s		Ba 121 29.7 s	
									55	Cs 132.9054	Cs 116 3.9 s	Cs 117 8 s	Cs 118 16.4 s	Cs 119 37.7 s	Cs 120 60 s	Cs 121 2.1 m
							54	Xe 131.30	Xe 113 2.8 s		Xe 115 18 s	Xe 116 56 s	Xe 117 66 s	Xe 118 6 m	Xe 119 6 m	Xe 120 40 m
							53	J 126.9045				J 115 1.3 m	J 116 2.2 s	J 117 2.4 m	J 118	J 119 19 m
			52	Te 127.60	Te 107? 2.2 s	Te 108?	Te 109? 4.4 s		Te 111 19.3 s	Te 112 1.8 m	Te 113 1.4 m	Te 114 16 m	Te 115 6.0 m	Te 116 2.5 h	Te 117 1.1 h	Te 118 6.0 d
			51	Sb 121.75					Sb 110 23.0 s	Sb 111 74.1 s	Sb 112 53.5 s	Sb 113 6.74 m	Sb 114	Sb 115 32.3 m	Sb 116	Sb 117 2.8 h
			50	Sn 118.69		Sn 106 10 s	Sn 107 1.3 m	Sn 108 10.5 m	Sn 109	Sn 110 4.0 h	Sn 111 35.3 m		Sn 113			
			49	In 114.82	In 104	In 105	In 106	In 107	In 108	In 109	In 110	In 111	In 112		In 114	
48	Cd 112.40	Cd 100 1.1 m	Cd 101 1.2 m	Cd 102 5.5 m	Cd 103 7.3 m	Cd 104 57.7 m	Cd 105 55 m		Cd 107 6.5 h		Cd 109 453 d					
Ag 107.868		Ag 99 1.8 m	Ag 100	Ag 101	Ag 102	Ag 103	Ag 104	Ag 105	Ag 106		Ag 108		Ag 110	Ag 111	Ag 112 3.12 h	Ag 113
Pd 106.4	Pd 97 3.3 m	Pd 98 18 m	Pd 99 21.4 m	Pd 100 3.7 d	Pd 101 8.47 h		Pd 103 17 d				Pd 107		Pd 109		Pd 111	Pd 112 20.1 h
Rh 95 4.8 m	Rh 96	Rh 97	Rh 98	Rh 99	Rh 100 20 h	Rh 101	Rh 102		Rh 104	Rh 105	Rh 106	Rh 107 22 m	Rh 108	Rh 109	Rh 110	Rh 111? 62.7 s
Ru 94 51.8 m	Ru 95 1.65 h		Ru 97 2.9 d						Ru 103 39.36 d		Ru 105 4.44 h	Ru 106 368 d	Ru 107 3.8 m	Ru 108 4.5 m	Ru 109 34.5 s	Ru 110 13 s


68
70
72
74
76
78
80

Z															
66													Dy 162,50 σ 930		
65													Tb 158,9254		Tb 146 23 s
64										Gd 157,25 σ 49000		Gd 142 1,8 m	Gd 143 1,9 m | 41 s	Gd 144 4,5 m	Gd 145 85 s | 21,8 m
63									Eu 151,96	Eu 139 22 s	Eu 140 1,3 s	Eu 141 4 s | 37 s	Eu 142 1,2 m | 2,4 s	Eu 143 2,6 m	Eu 144 10,5 s
62							Sm 150,4 σ 5800		Sm 137 44 s	Sm 138 3,0 m	Sm 139 9,5 s | 2,6 m	Sm 140 14,7 m	Sm 141 22,6 m | 11,3 m	Sm 142 72,4 m	Sm 143 65 s | 8,83 m
61							Pm		Pm 136 1,5 m	Pm 137 2,4 m	Pm 138 3,5 m	Pm 139	Pm 140 5,8 m | 9,2 s	Pm 141 20,9 m	Pm 142 40,5 s
60							Nd 144,24 σ 50,5	Nd 134 8,5 m	Nd 135 5,5 m | 12,0 m	Nd 136 50,7 m	Nd 137	Nd 138 5,1 h	Nd 139 5,5 h | 29,7 m	Nd 140 3,38 d	Nd 141 62 s | 2,5 h
59			Pr 140,9077 σ 11,5				Pr 132 1,6 m	Pr 133 6,5 m	Pr 134 ~11 m | 17 m	Pr 135 25 m	Pr 136 13,1 m	Pr 137 76,6 m	Pr 138 2,02 h | 1,44 m	Pr 139 4,5 h	Pr 140 3,4 m
58			Ce 140,12 σ 0,63	Ce 128 ? 5,5 m	Ce 129 3,5 m	Ce 130 25 m	Ce 131 10 m | 8,5 m	Ce 132 4,2 h	Ce 133 97 m | 5,4 h	Ce 134 72 h	Ce 135 20 s | 17,6 h		Ce 137 34,4 h | 9,0 h		Ce 139 56,4 s | 137,6 d
57		La 138,9055 σ 9,0	La 126 1,0 m	La 127 3,8 m	La 128 4,9 m	La 129 10 m	La 130 8,7 m	La 131 59 m	La 132 24 m | 4,8 h	La 133 4,0 h	La 134 6,8 m	La 135 19,4 h	La 136 9,9 m	La 137 6 · 10⁴ a	1,3 · 10¹¹ a
56	Ba 123 2,7 m	Ba 124 11,9 m	Ba 125 8,0 m | 3,5 m	Ba 126 97 m	Ba 127	Ba 128 2,43 d	Ba 129 2,13 h | 2,20 h		Ba 131 14,3 m | 11,8 d		Ba 133 38,9 h | 10,5 a		28,7 h		2,55 m
55	Cs 122	Cs 123	Cs 124 26,5 s	Cs 125 45 m	Cs 126 1,6 m	Cs 127 6,25 h	Cs 128 3,8 m	Cs 129 32,06 h	Cs 130 29,9 m	Cs 131 9,70 d	Cs 132 6,47 d		Cs 134 2,90 h | 2,06 a	Cs 135	Cs 136 13,0 d

Pm 143 265 d	Pm 144 1,0 a	Pm 145 17,7 a	Pm 146 5,53 a	Pm 147 2,62 a	Pm 148	Pm 149 53,1 h	Pm 150 2,7 h	Pm 151 28 h	Pm 152	Pm 153 5,3 m	Pm 154	
		2,3·10^15 a			Nd 147 10,98 d		Nd 149 1,73 h		Nd 151 12,4 m	Nd 152 11,4 m		0,076
	Pr 142 19,2 h	Pr 143 13,57 d	Pr 144 17,3 m	Pr 145 5,98 h	Pr 146 24,0 m	Pr 147 12,0 m	Pr 148 1,98 m	Pr 149	Pr 150 10 s	Pr 151 4 s		0,184
	Ce 141 32,51 d		Ce 143 33,0 h	Ce 144 284,8 d	Ce 145 3,0 m	Ce 146 13,9 m	Ce 147 57 s	Ce 148 48 s	Ce 149 5 s	Ce 150 3,5 s		0,270
	La 140 40,2 h	La 141 3,93 h	La 142 92,6 m	La 143 14,2 m	La 144 39,5 s	La 145 29 s	La 146 6,3 s	La 147 1,6 s	La 148 1,3 s	1,07 92	0,646	0,420
	Ba 139 82,7 m	Ba 140 12,79 d	Ba 141 18,3 m	Ba 142 10,7 m	Ba 143 20 s	Ba 144 11,9 s	Ba 145 5,6 s	Ba 146 2,2 s			1,07	
Cs 137 30,1 a	Cs 138 2,90 m / 32,2 m	Cs 139 9,3 m	Cs 140 64 s	Cs 141 24,7 s	Cs 142 1,68 s	Cs 143 1,68 s	Cs 144 1,0 s	Cs 145 0,61 s	Cs 146 0,19 s		1,68	
	Xe 137 3,83 m	Xe 138 14,1 m	Xe 139 39,7 s	Xe 140 13,6 s	Xe 141 1,79 s	Xe 142 1,24 s	Xe 143 0,83 s	Xe 144 <1 s	Xe 145 0,9 s		2,25	
J 135 6,59 h	J 136 46 s / 83 s	J 137 24,2 s	J 138 6,3 s	J 139 2,3 s	J 140 0,87 s	J 141 0,46 s					2,97	
Te 134 41,8 m	Te 135 18 s	Te 136 20,9 s	Te 137 3,5 s		6,60	6,36 88	5,82	5,87 90	5,86	5,39 92	3,83	
Sb 133 2,3 m	Sb 134	Sb 135 1,7 s			6,80							
Sn 132 40 s	Sn 133 1,5 s				6,26							
In 131 0,3 s	In 132 0,12 s		7,65	8,60 86	6,18							
1,7 82	2,82	4,20 84	6,75									

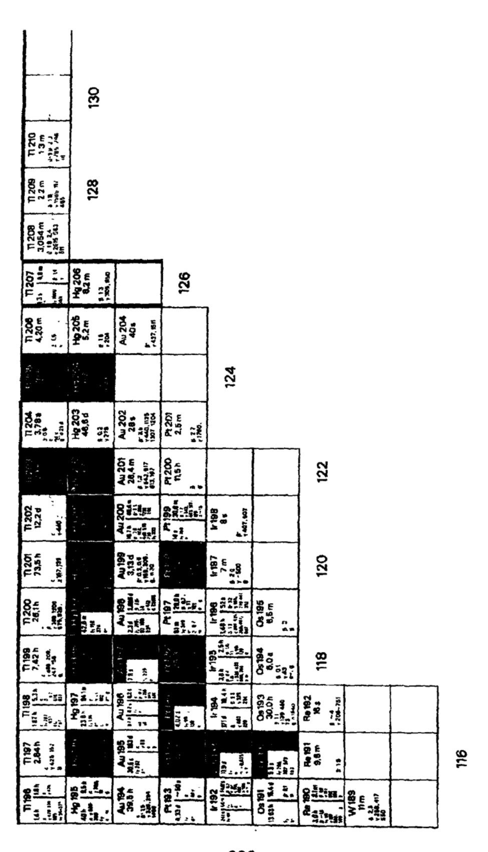
74					W 183,85	W162 <0,25 s	W163 2,5 s	W164 6,3 s							W170 4 m	W171 8,0 m	W172 6,7 m
73					Ta 180,9479								Ta167 2,9 m	Ta168 3,4 m	Ta169 5,0 m	Ta170 6,3 m	Ta171
72		Hf 178,49		Hf157 0,12 s	Hf158 2,8 s	Hf159 5,6 s	Hf160 ~12 s	Hf161 17 s					Hf166 6,8 m	Hf167 2,05 m	Hf168 25,95 m	Hf169 3,25 m	Hf170 16,0 h
71		Lu 174,97	Lu155 0,07 s	Lu156						Lu162 1,4 m		Lu164 3,1 m	Lu165 11,8 m	Lu166 2,3 m	Lu167 58 m	Lu168	Lu169
70		Yb 173,04	Yb154 0,39 s	Yb155 1,65 s	Yb156 24 s	Yb157 34 s	Yb158 1,5 m	Yb159? 4,8 m	Yb160 4,8 m	Yb161? 4,1 m	Yb162 18,9 m	Yb163 11,1 m	Yb164 75,8 m	Yb165 10,5 m	Yb166 56,7 h	Yb167 17,7 m	
69		Tm 168,9342	Tm153 1,6 s	Tm154	Tm155 39 s	Tm156		Tm158 4,3 m	Tm159 12 m	Tm160 9,2 m	Tm161 37 m	Tm162 21,8 m	Tm163 1,81 h	Tm164	Tm165 30,06 h	Tm166 7,70 h	Tm167 9,25 d
	Er 167,26	Er151 23 s	Er152 9,8 s	Er153 36 s	Er154 5,8 m	Er155 5,3 m		Er157 ~25 m	Er158 2,3 h	Er159 36 m	Er160 28,6 h	Er161 3,1 h		Er163 75 m		Er165 10,3 h	
	Ho 164,9304	Ho150 ~30 s	Ho151	Ho152	Ho153	Ho154	Ho155 48 m	Ho156	Ho157 12,6 m	Ho158	Ho159	Ho160	Ho161	Ho162	Ho163	Ho164	
	Dy148 3,1 m	Dy149 4,1 m	Dy150 7,2 m	Dy151 17 m	Dy152 2,4 h	Dy153 6,29 h	Dy154 10⁶ a	Dy155 9,55 h		Dy157 8,1 h		Dy159 144,4 d					
	Tb147	Tb148	Tb149	Tb150	Tb151 17,6 h	Tb152	Tb153 2,34 d	Tb154	Tb155 5,32 d	Tb156	Tb157 150 a	Tb158		Tb160 72,1 d	Tb161 6,90 d	Tb162 7,6 m	Tb163 19,5 m
	Gd146 48,3 d	Gd147 38,1 h	Gd148 ~90 a	Gd149 9,5 d	Gd150 1,8·10⁶ a	Gd151 120 d		Gd153 241,6 d						Gd159 18,56 h		Gd161 3,6 m	Gd162 8,2 m
	Eu145 5,93 d	Eu146 4,65 d	Eu147 24 d	Eu148 54 d	Eu149 93,1 d	Eu150		Eu152		Eu154 8,5 a	Eu155 4,96 a	Eu156 15,2 d	Eu157 15,15 h	Eu158 46 m	Eu159 18,7 m	Eu160 42 s	0,000068
		Sm145 340 d	Sm146 7·10⁷ a	1,06·10¹¹ a	7·10¹⁵ a			Sm151 93 a		Sm153 46,75 h		Sm155 22,4 m	Sm156 9,4 h	Sm157 8,0 m			0,00035
													0,0328	0,0133	0,0084	0,0031	0,00102
													94		96		98

W173 16,5m	W174 29m	W175 34m	W176 2,5h	W177 2,25h	W178 22d	W179 6,7m / 38m	[illegible]	W181 121,2d	[illegible]	[illegible]	[illegible]	W185 1,65m / 75,1d	[illegible]	W187 23,8h	W188 69d
Ta172 37,0m	Ta173 3,6h	Ta174 1,2h	Ta175 10,5h	Ta176 8,1h	Ta177 56,6h	Ta178	Ta179 ~600d	[illegible]	[illegible]	Ta182	Ta183 5,0d	Ta184 8,7h	Ta185 49m	Ta186 10,5m	
Hf171 12,2h	Hf172 1,87a	Hf173 23,6h	2,0·10¹⁵a	Hf175 70,0d	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	Hf181 42,4d	Hf182	Hf183 64m	Hf184 4,12h		
Lu170 2,0d	Lu171	Lu172	Lu173 1,37a	Lu174	[illegible]	[illegible]	Lu177	Lu178	Lu179 4,6h	Lu180 5,7m					
Yb169	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	Yb175 4,2d	[illegible]	Yb177	Yb178 74m						
Tm168 93,1d	[illegible]	Tm170 128,6d	Tm171 1,92a	Tm172 63,6h	Tm173 8,2h	Tm174 5,4m	Tm175 15,2m	Tm176 1,9m							
[illegible]	[illegible]	Er169 9,3d	[illegible]	Er171 7,5h	Er172 49h	Er173 1,4m									
Ho166	Ho167 3,1h	Ho168 3,0m	Ho169 4,8m	Ho170											
Dy165	Dy166 81,5h	Dy167 ~4,6m													
Tb164 3,0m															

100 102 104 106 108 110 112 114

Z							
80						Hg 200,59	Hg178 0,47s
79					Au 196,9665		Au177 1,3s
78		Pt 195,09		Pt173 short	Pt174 0,7s	Pt175 2,52s	Pt176 6,33s
77		Ir 192,22	Ir171 1,0s	Ir172 1,7s	Ir173 3,0s	Ir174 4,0s	Ir175 4,5s
76	Os 190,2	Os169 3,0s	Os170 7,1s	Os171 8,2s	Os172 19s	Os173 16s	Os174 45s
75	Re 186,207			Re170 9s		Re172 23s	

												86	Rn		Rn 200 1,0 s
										85	At	At 196 0,3 s	At 197 0,4 s	At 198 1,5 s / 4,9 s	At 199 7,2 s
							84	Po		Po 193 short	Po 194 0,6 s	Po 195 2,0 s / 4,5 s	Po 196 5,5 s	Po 197 26 s / 56 s	Po 198 1,76 m
					83	Bi 208,9804	Bi 189 <1,5 s	Bi 190 5,4 s	Bi 191 20 s / 13 s	Bi 192 42 s	Bi 193 3,5 s / 64 s	Bi 194 1,8 m	Bi 195 2,8 m	Bi 196 4,5 m	Bi 197 ~10 m
			82	Pb 207,2	Pb 186 8 s	Pb 187 17 s	Pb 188 24,5 s	Pb 189 51 s	Pb 190 1,2 m	Pb 191 1,3 m	Pb 192 2,3 m		Pb 194 11 m	Pb 195 17 m	Pb 196 37 m
			81	Tl 204,37		Tl 186 26 s / ~1 m	Tl 187 ? 13 s	Tl 188 1,2 m / 1,2 m	Tl 189 1,4 m / 2,3 m	Tl 190 2,7 m / 2,6 m	Tl 191 5,2 m	Tl 192 11 m / 9,6 m	Tl 193 21 m / 21,0 m	Tl 194 32,8 m / 33 m	Tl 195 3,6 s / 1,2 h
Hg 179 1,09 s	Hg 180 2,9 s	Hg 181 3,6 s	Hg 182 11,2 s	Hg 183 8,8 s	Hg 184 30,6 s	Hg 185 21 s / 50 s	Hg 186 1,4 m	Hg 187 1,6 m / 2,4 m	Hg 188 3,25 m	Hg 189 8,7 m / 7,7 m	Hg 190 20,0 m	Hg 191 50,8 m / ~50 m	Hg 192 4,8 h	Hg 193 11,1 h / ~6 h	Hg 194 ≥15 a
Au 178 2,6 s	Au 179 7,2 s		Au 181 11,5 s	Au 182 22 s	Au 183 42 s	Au 184 53 s	Au 185 6,8 m / 4,2 m	Au 186 <2 m / 10,7 m	Au 187 8,4 m / 8,3 m	Au 188 8,8 m	Au 189 4,6 m / 28,7 m	Au 190 42,8 m	Au 191 3,18 h	Au 192 5,0 h	Au 193 3,9 s / 17,65 h
Pt 177 11 s	Pt 178 20 s	Pt 179 33 s	Pt 180 50 s	Pt 181 51 s	Pt 182 2,6 m	Pt 183 6,5 m	Pt 184 17,3 m	Pt 185 33 m / 1,2 h	Pt 186 2,0 h	Pt 187 2,35 h	Pt 188 10,2 d	Pt 189 11 h	6,1·10^11 a	Pt 191 2,8 d	
Ir 176 8 s	Ir 177 21 s	Ir 178 12 s	Ir 179 4 m	Ir 180 1,6 m	Ir 181 5,0 m	Ir 182 15 m	Ir 183 58 m	Ir 184 3,0 h	Ir 185 14 h	Ir 186 1,75 h / 15,8 h	Ir 187 11 h	Ir 188 41,5 h	Ir 189 13,3 d	Ir 190	4,9 s
Os 175 1,4 m	Os 176 3,6 m	Os 177 3,5 m	Os 178 5,0 m	Os 179	Os 180 21,7 m	Os 181 2,7 m / 1,8 h	Os 182 22,1 h	Os 183 10 h / 14 h		Os 185 94 d	2,0·10^15 a				
Re 174 2,1 m	Re 175 5 m	Re 176 5,7 m	Re 177 14 m	Re 178 13,2 m	Re 179 19,7 m	Re 180 2,5 m	Re 181 20 h	Re 182 13 h / 64 h	Re 183 71 d	Re 184 165 d / 38 d		Re 186	5·10^10 a	Re 188	Re 189 24,3 h


Tl196
Tl197 2.84h
Tl198
Tl199 7.42h
Tl200 26.1h
Tl201 73.5h
Tl202 12.2d
Tl204 3.78a
Tl206 4.20m
Tl207
Tl208 3.054m
Tl209 2.2m
Tl210 1.3m
Hg195
Hg197
Hg203 46.6d
Hg205 5.2m
Hg206 8.2m
Au194 39.5h
Au195
Au196
Au198
Au199 3.13d
Au200
Au201 26.4m
Au202 28s
Au204 40s
Pt193
Pt197
Pt199
Pt200 11.5h
Pt201 2.5m
Ir192
Ir194
Ir195
Ir196
Ir197 7m
Ir198 8s
Os191
Os193 30.0h
Os194 6.0a
Os195 6.5m
Re190
Re191 9.8m
Re192 16s
W189 11m
116
118
120
122
124
126
128
130

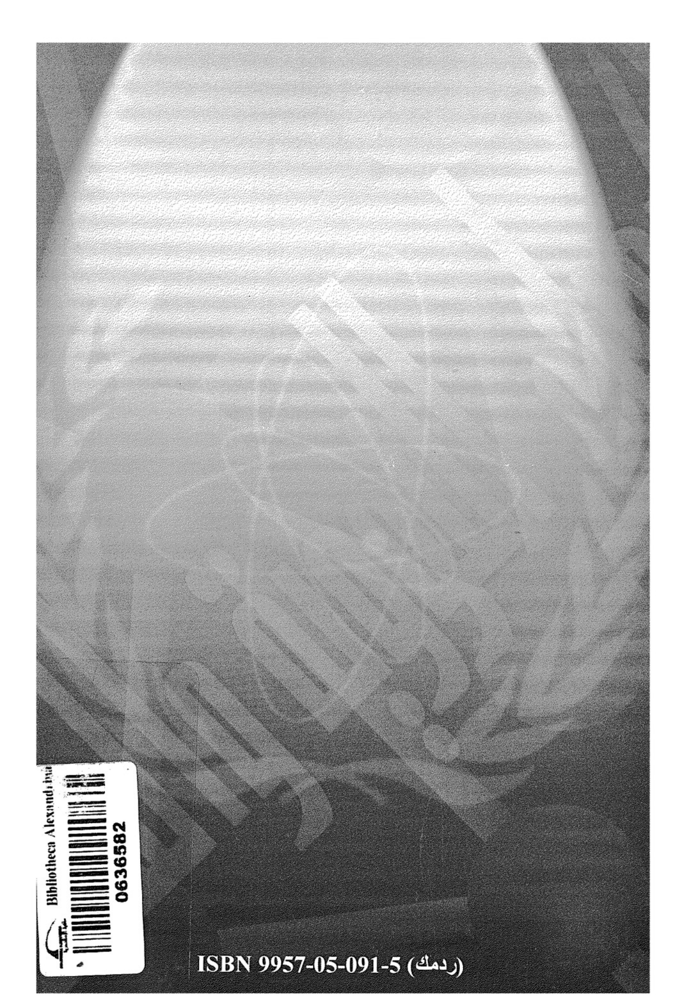
								91	Pa 231,0359	Pa 216 0,20 s	Pa 217 ? short					Pa 222 5,7 ms
						90	Th 232,0381	Th 213 ? 0,15 s	Th 214 ? 0,13 s	Th 215 1,2 s	Th 216 28 ms	Th 217 252 μs	Th 218 0,1 μs	Th 219 1,0 μs	Th 220 9,7 μs	Th 221 1,68 ms
			89	Ac	Ac 209 0,10 s	Ac 210 0,35 s	Ac 211 0,25 s	Ac 212 0,93 s	Ac 213 0,80 s	Ac 214 8,2 s	Ac 215 0,17 s	Ac 216 0,33 ms | ~0,3 ms	Ac 217 0,11 μs	Ac 218 0,27 μs	Ac 219 7 μs	Ac 220 26 ms
Ra 226,0254			Ra 206 0,4 s	Ra 207 1,3 s	Ra 208 1,4 s	Ra 209 4,6 s	Ra 210 3,7 s	Ra 211 13 s	Ra 212 14 s	Ra 213 2,74 m	Ra 214 2,5 s	Ra 215 1,6 ms	Ra 216 0,18 μs	Ra 217 1,6 μs	Ra 218 14 μs	Ra 219 10 ms
Fr	Fr 203 0,7 s	Fr 204 2,2 s | 3,3 s	Fr 205 3,7 s	Fr 206 15,6 s	Fr 207 14,7 s	Fr 208 59 s	Fr 209 54 s	Fr 210 3,18 m	Fr 211 3,08 m	Fr 212 19,3 m	Fr 213 34,7 s	Fr 214 3,4 ms | 5,0 ms	Fr 215 0,09 μs	Fr 216 0,70 μs	Fr 217 22 μs	Fr 218 0,7 ms
Rn 201 3,8 s | 7 s	Rn 202 9,85 s	Rn 203 28 s | 45 s	Rn 204 1,24 m	Rn 205 2,83 m	Rn 206 5,67 m	Rn 207 9,3 m	Rn 208 24,4 m	Rn 209 30 m	Rn 210 2,4 h	Rn 211 14,6 h	Rn 212 24 m	Rn 213 25 ms	Rn 214 0,27 μs	Rn 215 2,3 μs	Rn 216 45 s	Rn 217 0,54 ms
At 200 4,3 s | 42 s	At 201 1,5 m	At 202 2,6 m | 3,0 m	At 203 7,3 m	At 204 9,3 m	At 205 26,2 m	At 206 31,4 m	At 207 1,8 h	At 208 1,63 h	At 209 5,5 h	At 210 8,3 h	At 211 7,2 h	At 212 122 ms | 315 ms	At 213 0,11 μs	At 214 ~2 μs	At 215 ~0,1 ms	At 216 0,3 ms
Po 199 4,2 m | 5,2 m	Po 200 11,5 m	Po 201 8,8 m | 15,3 m	Po 202 45,0 m	Po 203 1,2 m | 37 m	Po 204 3,52 h	Po 205 1,8 h	Po 206 8,8 d	Po 207 2,8 s | 5,84 h	Po 208 2,898 a	Po 209 102 a	Po 210 138,38 d	Po 211 25,5 s | 0,56 s	Po 212 45 s | 0,3 μs	Po 213 4,2 μs	Po 214 164 μs	Po 215 1,78 ms
Bi 198 7,7 s | 11,8 m	Bi 199 24,7 m | 27 m	Bi 200 36 m	Bi 201 59 m | 1,7 h	Bi 202 1,8 h	Bi 203 11,76 h	Bi 204 11,3 h	Bi 205 15,31 d	Bi 206 6,24 d	Bi 207 38 a	Bi 208 3,68 · 10⁵ a	Bi 209	Bi 210 3·10⁶ a | 5,01 d	Bi 211 2,13 m	Bi 212 60,55 m	Bi 213 45,59 m	Bi 214 19,9 m
Pb 197 42 m | 8 m	Pb 198 2,40 h	Pb 199 12 m | 1,5 h	Pb 200 21,5 h	Pb 201 61 s | 9,4 h	Pb 202 3,62 h | ~3·10⁵ a	Pb 203 6,2 s | 52,1 h	Pb 204 66,9 m | 1,4·10¹⁷ a	Pb 205 1,4 · 10⁷ a	Pb 206	Pb 207	Pb 208	Pb 209 3,25 h	Pb 210 22,3 a	Pb 211 36,1 m	Pb 212 10,64 h	Pb 213 10,2 m

101

Z \ N	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145
100												Fm	Fm 244 3,3 ms	Fm 245 4,2 s
99												Es	Es 243 20 s	Es 244 40 s
98										Cf	Cf 240 1,06 m	Cf 241 3,78 m	Cf 242 3,68 m	Cf 243 10,7 m
97										Bk				Bk 242
96									Cm		Cm 238 2,4 h	Cm 239 3 h	Cm 240 27 d	Cm 241 35 d
95					Am	Am 232? 1,4 m		Am 234 2,6 m			Am 237 73 m	Am 238 1,6 h	Am 239 11,9 h	Am 240 50,8 h
94			Pu				Pu 232 34 m	Pu 233 20,9 m	Pu 234 8,8 h	Pu 235 25 m	Pu 236 2,85 a	Pu 237 45,6 d	Pu 238 87,75 a	Pu 239 2,439·10⁴ a
93		Np 237,0482	Np 227 60 s	Np 228	Np 229 4,0 m	Np 230 4,6 m	Np 231 48,8 m	Np 232 14,7 m	Np 233 36,2 m	Np 234 4,4 d	Np 235 396 d	Np 236	Np 237 2,14·10⁶ a	Np 238 50,8 h
92		U 238,029	U 226 0,5 s	U 227 1,1 m	U 228 9,2 m	U 229 58 m	U 230 20,8 d	U 231 4,2 d	U 232 71,7 a	U 233 1,59·10⁵ a	[illegible]	[illegible]	U 236 2,342·10⁷ a	U 237 6,75 d
91	Pa 223 6,5 ms	Pa 224 0,95 s	Pa 225 1,8 s	Pa 226 1,8 m	Pa 227 38,3 m	Pa 228 26 h	Pa 229 1,4 d	Pa 230 17,6 d	Pa 231 3,28·10⁴ a	Pa 232 1,32 d	Pa 233 27,0 d	Pa 234	Pa 235 24,2 m	Pa 236 9,1 m
90	Th 222 2,8 ms	Th 223 0,66 s	Th 224 1,03 s	Th 225 8 m	Th 226 31 m	Th 227 18,72 d	Th 228 1,913 a	Th 229 7340 a	Th 230 7,7·10⁴ a	Th 231 25,6 h	[illegible]	Th 233 22,3 m	Th 234 24,10 d	Th 235 6,9 m
89	Ac 221 52 ms	Ac 222	Ac 223 2,2 m	Ac 224 2,9 h	Ac 225 10,0 d	Ac 226 29 h	Ac 227 21,8 a	Ac 228 6,13 h	Ac 229 62,7 m	Ac 230 80 s	Ac 231 7,5 m	Ac 232 35 s		
88	Ra 220 23 ms	Ra 221 28 s	Ra 222 38 s	Ra 223 11,43 d	Ra 224 3,64 d	Ra 225 14,8 d	Ra 226 1600 a	Ra 227 41 m	Ra 228 5,75 a	Ra 229 4,0 m	Ra 230 1 h			
87	Fr 219 20 ms	Fr 220 27,5 s	Fr 221 4,8 m	Fr 222 14,8 m	Fr 223 21,8 m	Fr 224 2,7 m	Fr 225 3,9 m	Fr 226 48 s	Fr 227 2,4 m	Fr 228 39 s	Fr 229 50 s			
86	Rn 218 35 ms	Rn 219 3,96 s	Rn 220 55,6 s	Rn 221 25 m	Rn 222 3,824 d	Rn 223 43 m	Rn 224 1,9 h	Rn 225 4,5 m	Rn 226 6,0 m					
85	At 217 32,3 ms	At 218 ~2 s	At 219 0,9 m											
84	Po 216 0,15 s	Po 217 <10 s	Po 218 3,05 m											
83	Bi 215 7,4 m													
82	Pb 214 26,8 m													

ت : 151 تاريخ استلام : 1/2/2008

105										260 1,6 s	261 1,8 s	262 ~40 s	
104								257 4,5 s	258 11 ms	259 3 s	260 0,1 s	261 65 s	
103						Lr	Lr 255 22 s	Lr 256 31 s	Lr 257 0,6 s	Lr 258 4,2 s	Lr 259 5,4 s	Lr 260 3 m	
102		No		No 251 0,8 s	No 252 2,3 s	No 253 1,6 m	No 254 0,28 s / 55 s	No 255 3,1 m	No 256 3,5 s	No 257 26 s	No 258 1,2 ms	No 259 58 m	
	Md	Md 248 7 s	Md 249 24 s	Md 250 52 s	Md 251 4,0 m	Md 252 2,3 m		Md 254 10 m / 28 m	Md 255 27 m	Md 256 1,3 h	Md 257 5,0 h	Md 258 56 d	
	Fm 246 1,2 s	Fm 247 9,2 s / 35 s	Fm 248 37 s	Fm 249 2,6 m	Fm 250 1,8 s / 30 m	Fm 251 5,30 h	Fm 252 22,8 h	Fm 253 3,0 d	Fm 254 3,24 h	Fm 255 20,1 h	Fm 256 2,63 h	Fm 257 100,5 d	Fm 258 0,38 ms
	Es 245 1,3 m	Es 246 7,3 m	Es 247 4,7 m	Es 248 28 m	Es 249 1,7 h	Es 250 2,1 h / 8,6 h	Es 251 33 h	Es 252 401 d	Es 253 20,47 d	Es 254 39,3 h / 276 d	Es 255 39,8 d		
	Cf 244 19,7 m	Cf 245 43,6 m	Cf 246 35,7 h	Cf 247 2,45 h	Cf 248 333,5 d	Cf 249 350,6 a	Cf 250 13,08 a	Cf 251 898 a	Cf 252 2,62 a	Cf 253 17,8 d	Cf 254 60,5 d		
	Bk 243 4,5 h	Bk 244 4,35 h	Bk 245 4,98 d	Bk 246 1,83 d	Bk 247 1380 a	Bk 248 18 h / >9 a	Bk 249 314 d	Bk 250 3,22 h	Bk 251 57 m		156		158
	Cm 242 163,0 d	Cm 243 30 a	Cm 244 18,099 a	Cm 245 8532 a	Cm 246 4820 a	Cm 247 $1,56 \cdot 10^7$ a	Cm 248 $3,61 \cdot 10^5$ a	Cm 249 64,2 m	Cm 250 $1,13 \cdot 10^4$ a				
	Am 241 433 a	Am 242 16 h / 141 a	Am 243 7400 a	Am 244 10 h / 26 m	Am 245 2,05 h	Am 246 25 m / 39 m	Am 247 22 m						
	Pu 240 6537 a	Pu 241 14,89 a	Pu 242 $3,87 \cdot 10^5$ a	Pu 243 4,96 h	Pu 244 $8,26 \cdot 10^7$ a	Pu 245 10,48 h	Pu 246 10,9 d						
	Np 239 2,355 d	Np 240 7,4 m / 65 m	Np 241 16,0 m		150		152		154				
	U 238 $4,47 \cdot 10^9$ a	U 239 23,5 m	U 240 14,1 h										
	Pa 237 8,7 m	Pa 238 2,3 m											
	Th 236 37,5 m												
			148										
	146												



ISBN 9957-05-091-5 (ردمك)